



TUGAS AKHIR – TM141585

STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN VARIASI DIAMETER *INLET CIRCULAR DISTURBANCE BODY* ($R/D_h = 1,5$; $d/D_h = 0.064, 0.08, \text{ Dan } 0.1$)

ANGGA EKA WAHYU RAMADAN
NRP. 2113 100 122

Dosen Pembimbing :
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLOW
THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW
90° WITH DIAMETER VARIANT INLET CIRCULAR
DISTURBANCE BODY**

($R/D_h = 1,5$; $d/D_h = 0.064, 0.08$, Dan 0.1)

ANGGA EKA WAHYU RAMADAN
NRP. 2113 100 122

Advisor Lecturer :
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

BACHELOR DEGREE PROGRAM
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN VARIASI DIAMETER INLET *CIRCULAR DISTURBANCE BODY*
($R/D_h = 1,5$; $d/D_h = 0.064, 0.08, \text{ dan } 0.1$)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ANGGA EKA WAHYU RAMADAN

NRP. 2113 100 122

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.Eng.
NIP. 197104051997021001 (Pembimbing)
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
NIP. 196412281990031002 (Penguji I)
3. Nur Ikhwan, ST, M.Eng.
NIP. 196709151995121001 (Penguji II)

SURABAYA

MEI, 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**Studi Eksperimen Aliran Melalui *Square Duct* dan
Square Elbow 90° dengan Variasi Diameter Inlet
*Circular Disturbance Body***

($R/D_h = 1.5$; $d/D_h = 0.064, 0.08$, dan 0.1)

Nama Mahasiswa : Angga Eka Wahyu Ramadan
NRP : 2113 100 122
Departemen : Teknik Mesin FTI – ITS
**Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST.,
MT.**

ABSTRAK

Instalasi perpipaan dibentuk dari saluran lurus dan berbentuk *fitting*, misal *fitting* berbentuk *elbow 90°*. Pemasangan *elbow* digunakan untuk membelokkan arah aliran agar instalasi terpasang sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan. Namun pemasangan *elbow* juga memiliki dampak lain yaitu dari segi penggunaan energi. Hal tersebut terjadi karena *elbow* selalu dikaitkan dengan *pressure drop* yang lebih tinggi dibandingkan saluran lurus dengan kecepatan *freestream* yang sama. *Pressure drop* muncul akibat adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah aliran melewati *fitting* tersebut

Eksperimen dilakukan pada saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*) dengan $D_h = 125 \text{ mm}$ yang terdiri dari : *upstream duct (straight duct)* dengan panjang $6D_h$, *inlet disturbance body* (IDB) dengan penempatan pada jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0.2 D_h$, dan variasi diameter $d = 0.064 D_h, 0.08 D_h, 0.1 D_h$ di

inlet elbow, *elbow 90°*, dan dilengkapi *downstream duct (straight duct)* dengan panjang $16 D_h$, serta *induced draft fan*. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan *pitot static tube*, *inclined manometer*, dan *pressure transducer*. Pengujian dilakukan dengan variasi diameter *inlet disturbance body* $0.064 D_h$, $0.08 D_h$ sampai $0.1 D_h$ dengan Re_{D_h} sebesar $8,19 \times 10^4$ untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang *downstream duct*, *pressure drop* antara *downstream duct* dan *upstream duct* berupa nilai *pressure coefficient*, dan koefisien *loss minor elbow 90°* pada variasi nilai Re_{D_h} sebesar $4,09 \times 10^4 < Re_{D_h} < 1,39 \times 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s).

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada studi eksperimen, dapat disimpulkan bahwa penempatan *inlet disturbance body* dapat melawan *advers pressure* sehingga dapat menurunkan nilai *pressure drop*. Hasil studi eksperimen menunjukkan bahwa penambahan IDB mampu menurunkan nilai *pressure drop* secara rata-rata yaitu sebesar 30% untuk variasi IDB $0.1 D_h$. Sedangkan nilai *loss coefficient elbow 90°* tertinggi untuk variasi $0.1 D_h$ mencapai 0.05, nilai tersebut lebih rendah dibandingkan dengan variasi yang lainnya. Penambahan IDB juga mampu menurunkan nilai selisih *coefficient pressure* (ΔC_p), tetapi variasi $0.1 D_h$ menunjukkan nilai yang paling rendah dibandingkan dengan variasi $0.064 D_h$ dan $0.08 D_h$. Pada eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa variasi $0.1 D_h$ merupakan variasi yang paling efektif untuk menurunkan nilai *pressure drop* dengan nilai intensitas turbulensi (IT) sebesar 30.92%.

Kata kunci: *Square Elbow 90°, Inlet Disturbance Body, Pressure Drop, Separation Loss, dan Secondary Flow*

**Experimental Investigation of The Flow Through
Square Duct and Square Elbow 90° with Diameter
Variant Inlet Circular Disturbance Body**

($R/D_h = 1,5$; $d/D_h = 0.064, 0.08$, and 0.1)

Name : Angga Eka Wahyu Ramadan
NRP : 2113 100 122
Department : Teknik Mesin FTI – ITS
Advisor Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, ST.,
MT.

ABSTRACT

Instalasi Piping instalation is made of straight line and fittings, such as 90° elbow. Elbow is used to turn a flow direction to make the instalation installed properly. But, the instalation of elbows can impact the losses of energy. It often chained in causing higher pressure drop than the straight line pipe due to the same number of free stream velocity. Pressure drop happens in terms of friction loss, separation loss, and secondary flow which happens after the fluid flow through fittings.

Experimental reasearch been done with square duct with $D_d = 125$ mm which consist of: upstream duct (straight duct) length $6D_h$ single inlet circular body disturbande at a distance of $0,1 D_h$ in inlet elbow, elbow 90°, equipped with downstream duct (straight duct) with $16 D_h$ length and induced draft fan. Pitot static tube, inclined manometer, and pressure transducer is used for measurement. This experiment varies inlet disturbance body

diameter in $0.064D_h$, $0.08D_h$ to $0.1D_h$ with Re_{D_h} $7,88 \times 10^4$ in order to find velocity profile along downstream duct, pressure drop between downstream duct and upstream duct in the form of pressure coefficient, minor losses coefficient of 90° elbow, minor coefficient losses of single inlet Circular Body Disturbance varies from Re_{D_h} in $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < (air\ velocity\ 5\ m/s\ to\ 15\ m/s\ increasing\ by\ 1\ m/s)$.

Based on the experiment, we can conclude that the placement of inlet disturbance body can oppose adverse pressure so that the pressure drop decrease. Experimental study shows that the existence of IDB can decrease pressure drop by 30 percent in average in IDB $0,1D_h$. The highest value of loss coefficient elbow 90° for $0,1D_h$ variation is 0,05 that value is lower compare to the other variation. IDB can also decreasing the deviation of coefficient pressure (ΔCp), but the variation of $0,1D_h$ shows the lowest value compare to $0.064D_h$ dan $0.08D_h$ variation. In this experiment we can conclude that $0,1D_h$ variation is the most effective in decreasing pressure drop by 30,92% turbulent intensity.

Key words: Square Elbow 90° , Inlet Circular Body Disturbance, Pressure Drop, Separation Loss, dan Secondary Flow

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, khususnya Bapak Sumardi dan Ibu Sri Astutik Rustiningsih yang senantiasa mendoakan, mendorong, dan menyemangati penulis. Terimakasih karena telah menjadi bapak sekaligus ibu terbaik bagi penulis.
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD., Nur Ikhwan, ST, M.Eng., dan Dr. Ir. Heru Mirmanto selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.
4. Sutrisno selaku karyawan Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Fluida yang telah membantu dalam pembuatan alat Tugas Akhir ini.
5. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
6. Rekan pengerjaan dan asistensi Tugas Akhir penulis, Aqfha Hardhian S. F dan Rizkia Putra Pratama yang bersedia berjuang bersama untuk Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman angkatan M56 yang senantiasa memberi motivasi, menemani, dan meninggalkan banyak cerita indah bagi penulis selama ini.
8. Teman Riset Wawan Aries Widodo sekaligus teman seperjuangan untuk lulus secepat mungkin yang selalu

memberikan dukungan dan bantuan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

9. Teman-teman Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin yang senantiasa memberikan semangat dan motivasi untuk segera menyelesaikan perkuliahan di kampus Teknik Mesin ITS.
10. Teman-teman HRD'13 yang senantiasa memberikan motivasi dan mengingatkan penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan di ITS.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Mei 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Karakteristik Fluida.....	6
2.1.1 Viskositas.....	6
2.1.2 Densitas (ρ).....	6
2.2 Klasifikasi Jenis Aliran Fluida.....	7
2.2.1 Aliran <i>Viscous</i>	8
2.2.2 Aliran <i>Laminar</i> dan <i>Turbulen</i>	8
2.2.3 Aliran <i>Compressible</i> dan <i>Incompressible</i>	9
2.3 Fenomena Aliran di dalam Saluran.....	10
2.3.1 Separasi.....	11
2.3.2 Aliran Sekunder.....	12
2.4 Tekanan (P).....	13
2.5 <i>Head Loss</i>	16
2.5.1 <i>Head Loss Mayor</i>	16
2.5.2 <i>Head Loss Minor</i>	17
2.6 Karakteristik Aliran Melalui <i>Rectangular Duct Elbow 90°</i>	18
2.7 Penelitian pada <i>Rectangular Elbow 90°</i> dengan Penambahan <i>Guide Vane</i>	21
2.8 Penelitian Eksperimen tentang Aliran melalui <i>Square Duct</i> dan <i>Square Elbow 90°</i> dengan Variasi Sudut Buka dan <i>Damper</i>	24
2.9 Penelitian Eksperimen tentang Pengaruh Sebuah Silinder yang	

Diletakkan Dekat Dinding Plat Datar.....	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Skema Penelitian.....	30
3.2 Peralatan Pendukung.....	31
3.2.1 <i>Square Ducting</i>	31
3.2.2 <i>Centrifugal Fan</i>	32
3.2.3 <i>Honey Comb, Screen dan Nozzle</i>	33
3.2.4 <i>Inlet Circular Disturbance Body</i>	34
3.2.5 Alat Ukur.....	34
3.3 Analisa Dimensi Parameter - Parameter yang Dianalisa.....	37
3.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Ducting</i>	38
3.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada <i>Square</i>	40
3.4 Langkah-Langkah Validasi.....	41
3.4.1 Alat yang digunakan.....	41
3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis.....	42
3.4.3 Validasi Tekanan Statis.....	43
3.5 Prosedur Pengambilan Data.....	45
3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif.....	45
3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif.....	46
3.6 Urutan Langkah Penelitian.....	50
3.7 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	52
3.8 Gambar Peralatan Penelitian.....	53
3.9 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	55
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	56
4.1 <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Duct</i> dengan dan tanpa <i>Inlet</i> <i>Disturbance Body</i> pada <i>Elbow 90°</i> Fungsi <i>Reynolds</i> <i>Number</i>	56
4.2 <i>Loss Coefficient Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan dan tanpa <i>Inlet Disturbance Body</i> pada <i>Elbow 90°</i> Fungsi <i>Reynolds</i> <i>Number</i>	61
4.3 Perbandingan <i>Pressure Coefficient Elbow 90°</i> pada <i>Square</i> <i>Duct</i> dengan dan tanpa <i>Inlet Disturbance Body</i> pada Nilai <i>Reynolds Number</i> 8.74×10^4	63
4.4 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi <i>Upstream Duct</i> dan Sisi <i>Downstream Duct</i> $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$...66	66



4.4.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada Sisi <i>Downstream</i> <i>Duct</i> dengan $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$	68
4.4.2 Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada Sisi <i>Downstream</i> <i>Duct</i> dengan $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$	74
4.5 Perbandingan Intensitas Turbulensi Bidang Horizontal untuk Variasi Tanpa IDB dan IDB $0.1Dh$, $0.08Dh$, $0.064Dh$ pada $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$	79
4.6 Sub-bab Diskusi.....	83
4.6.1 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu.....	83
4.6.2 <i>Reattachment</i> pada <i>Coefficient Pressure</i> Sisi <i>Inner</i>	86
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	89
5.1 Kesimpulan.....	89
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

BAB II

Gambar 2.1 Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 1998).....	8
Gambar 2.2 Profil kecepatan aliran dalam saluran lurus (Fox dan Mc. Donald, 1998).....	10
Gambar 2.3 Separasi aliran pada <i>curved pipe</i> (Cheng, 1994).....	12
Gambar 2.4 <i>Secondary flow</i> (Miller, 1990).....	13
Gambar 2.5 Pengukuran tekanan statis menggunakan <i>pressure tap</i> (a) <i>pressure probe</i> (b) (Fox dan Mc. Donald, 1998).....	14
Gambar 2.6 Alat ukur <i>pitot tube</i> untuk tekanan stagnasi (Fox dan Mc. Donald, 1998).....	15
Gambar 2.7 Pengukuran Tekanan Total.....	15
Gambar 2.8 a). Posisi pengambilan data pada domain uji b). <i>Mesh</i> pada <i>volume</i> (Rup dan Sarna : 2011).....	18
Gambar 2.9 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk a). $\phi = 30^\circ$, b). $\phi = 60^\circ$, c). $x/Dh = 1.0$ pada $z/Dh = 0.0$ (Rup dan Sarna : 2011).....	19
Gambar 2.10 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi inner dan outer wall elbow hasil simulasi dan eksperimen (Rup dan Sarna : 2011).....	21
Gambar 2.11 (a) Bentuk geometri <i>elbow</i> (b) Lokasi pengukuran kecepatan (Sutardi dkk, 2010).....	22
Gambar 2.12 Distribusi C_p pada sisi <i>inner</i> dan <i>outer elbow</i> (Sutardi dkk, 2010).....	23
Gambar 2.13 Sketsa <i>Square Ducting</i> pada pandangan atas (Eduard : 2016).....	25
Gambar 2.14 Grafik C_p pada <i>Reynolds number</i> $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ dan variasi sudut bukaan <i>dampner</i> $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ dan 30° (Eduard : 2016).....	26
Gambar 2.15 Bentuk Geometri Silinder <i>Elips</i> dan Skema Penelitian (Choi & Lee, 2010).....	27
Gambar 2.16 <i>Mean streamwise velocity profiles</i> pada $X = 100, 150,$ dan 200 mm ; $AR = 1$; tanpa silinder; $\diamond G/B = 0,5$; $\blacklozenge G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010).....	29
Gambar 2.17 <i>Streamwise turbulence intensity</i> pada $X = 100, 150,$ dan 200 mm ; $AR = 1$; tanpa silinder; $\diamond G/B = 0,5$;	

200 mm; AR = 1; tanpa silinder;  G/B = 0.5;	
 G/B = 1.0 (Choi & Lee, 2010).....	29

BAB III

Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakan <i>inlet circular disturbance body</i>	30
Gambar 3.2 Model uji penelitian.....	31
Gambar 3.3 <i>Centrifugal Fan</i>	33
Gambar 3.4 <i>Nozzle</i>	33
Gambar 3.5 <i>Inlet Circular Disturbance Body</i>	34
Gambar 3.6 Skema pemasangan <i>wall pressure tap</i>	35
Gambar 3.7 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan.....	36
Gambar 3.8 <i>Inclined Manometer</i>	37
Gambar 3.9 Skema validasi tekanan dinamis <i>pressure transduser 1'' WC</i>	42
Gambar 3.10 Hasil validasi tekanan dinamis <i>pressure transduser 1'' WC</i>	43
Gambar 3.11 Skema validasi tekanan dinamis <i>pressure transduser 3'' WC</i>	44
Gambar 3.12 Hasil validasi tekanan statis <i>pressure transduser 3'' WC</i>	44
Gambar 3.13 <i>Flowchart</i> penelitian.....	52

BAB IV.

Gambar 4.1 <i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan variasi <i>Reynolds Number</i> $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ dan variasi diameter <i>inlet disturbance body</i> 0.064Dh, 0.08Dh, 0.1Dh.....	57
Gambar 4.2 Perbandingan <i>pressure drop</i> pada a). Titik 1-2 b). Titik 2-3 c). Titik 3-4 dengan variasi <i>Reynolds Number</i> $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ dan variasi diameter <i>inlet disturbance body</i> 0.064Dh, 0.08Dh, 0.1Dh.....	60
Gambar 4.3 <i>Loss Coefficient Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan dan tanpa <i>Inlet Disturbance Body</i> pada <i>Elbow 90°</i> Fungsi	

<i>Reynolds Number</i>	61
Gambar 4.4 Pressure coefficient elbow 90° dengan dan tanpa inlet disturbance body sebagai fungsi Reynolds number.....	65
Gambar 4.5 Grafik velocity profile (a) bidang horizontal sisi upstream straight duct (b) bidang vertikal sisi upstream straight duct.....	67
Gambar 4.6 Grafik profil kecepatan bidang horizontal pada masing-masing posisi cross section berdasarkan test section : (a) 1; (b) 2; (c) (g) 12; (h) 14.....	73
Gambar 4.7 Grafik profil kecepatan bidang vertikal pada masing masing posisi cross-section berdasarkan test section : (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 12; (h) 14.....	79
Gambar 4.8 Distribusi Intensitas Turbulensi (IT) pada bidang horizontal setelah elbow 90°	80
Gambar 4.9 Fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 1$ dan $z/D_h = 0,056$ pada (a) elbow ditambahkan IDB dengan diameter $0,1D_h$ dan (b) elbow tanpa ditambahkan IDB.....	82
Gambar 4.10 Perbandingan profil kecepatan hasil eksperimen dengan penelitian Rup & Sarna (2011) pada elbow 90°	85
Gambar 4.11 Perbandingan coefficient pressure hasil eksperimen dengan penelitian Rup & Sarna (2011) pada elbow 90°	86
Gambar 4.11 Coefficient pressure (C_p) pada sisi inner yang di plot untuk $Re_{8.74 \times 10^4}$	87

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Table 2.1 Pengaruh penambahan <i>guide vane</i> terhadap <i>pressure drop</i> . (Sutardi dkk, 2010).....	24
Tabel 3.1 Urutan langkah penelitian.....	51
Tabel 3.2 Peralatan penelitian.....	53
Tabel 3.3 Jadwal pelaksanaan penelitian.....	55

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan perekonomian saat ini telah menjadikan semua orang berlomba-lomba dalam mencukupi kebutuhan primernya, sebagai contoh adalah tempat tinggal dan pangan. Kondisi tersebut dimanfaatkan oleh sebagian besar pengusaha untuk membangun gedung-gedung apartemen, swalayan, dan mall. Dalam membuat gedung-gedung tersebut banyak hal-hal yang harus diperhatikan, sebagai contoh paling utama adalah kenyamanan. Dengan kondisi temperature bumi yang saat ini semakin tinggi membuat suhu ruangan menjadi lebih cepat meningkat, hal tersebut mengakibatkan tingkat kenyamanan menjadi rendah. Sehingga pendinginan menjadi kunci penting dalam pengoperasian gedung. Proses pendinginan sebuah gedung tidak memungkinkan jika hanya menggunakan blower ataupun ac biasa. Proses pendinginan tersebut membutuhkan penggunaan ac sentral, dimana ac ini membutuhkan saluran perpipaan rectangular(*ducting*) untuk mensirkulasikan antara udara panas dan udara dingin. Penyaluran udara harus mengikuti tata letak setiap ruangan, sehingga membutuhkan instalasi perpipaan yang sesuai dengan kebutuhan setiap ruangan.

Instalasi perpipaan dibentuk dari saluran lurus dan berbentuk *fitting*, misal *fitting* berbentuk *elbow* 90°. Pemasangan *elbow* digunakan untuk membelokkan arah aliran agar instalasi terpasang sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan. Namun pemasangan *elbow* juga memiliki dampak lain yaitu dari segi penggunaan energi. Hal tersebut terjadi karena *elbow* selalu dikaitkan dengan *pressure drop* yang lebih tinggi dibandingkan saluran lurus dengan kecepatan *freestream* yang sama. *Pressure drop* muncul akibat adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah aliran melewati *fitting* tersebut.

Pressure drop yang terjadi pada penambahan *fitting* sangat berpengaruh pada perilaku aliran didalamnya. Terbentuknya separasi menandakan bahwa aliran tersebut tidak mampu melawan *adverse pressure gradient*, sehingga aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utama yang dapat mengakibatkan terjadinya *vortex*. Sedangkan terbentuknya *secondary flow* diakibatkan oleh adanya perbedaan tekanan pada bagian *inner* dan *outer wall*. Perbedaan tersebut mengakibatkan partikel fluida yang berada di sisi *outer wall* bergerak menuju sisi *inner wall*. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya aliran balik sehingga menghambat laju aliran yang ada dibelakangnya. Aliran yang terhambat memberikan beban yang besar pada instalasi pendukungnya, seperti pompa. Berdasarkan kerugian tersebut pemasangan *elbow* menjadikan kebutuhan daya lebih besar dibandingkan tanpa *elbow*.

Beberapa upaya pendekatan dilakukan untuk mengamati perilaku aliran pada saluran *elbow*. Sebagai contoh pengamatan *velocity profile*, pengamatan tersebut oleh **Dutta & Nandi (2015)** tentang bentuk *velocity profile* pada aliran *elbow* pada $Re\ 10^5$ dengan variasi Rc/Dh dari 1 s/d 5, Rc adalah jari-jari kelengkungan dan Dh adalah diameter hidraulik saluran pipa. Eksperimen dilakukan dengan memasang pengukur pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° . Penelitian tersebut menunjukkan bahwa saluran *elbow* akan mengubah bentuk aliran yang awalnya uniform menjadi bentuk yang tak beraturan dikarenakan adanya separasi sehingga muncul aliran balik pada posisi 90°

Beberapa pendekatan untuk mengurangi kerugian aliran di dalam *elbow* juga dilakukan, misalnya penelitian eksperimen yang dilakukan oleh **Sutardi dkk (2010)**. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* pada instalasi yang menggunakan *elbow*. *Elbow* yang digunakan adalah *rectangular elbow* 90° dengan 4 variasi pemasangan *guide vane* yaitu tanpa *guide vane*, satu *guide vanes*, dua *guide vanes*, dan tiga *guide vanes*. Penggunaan Re pada

penelitian tersebut juga divariasikan yaitu 2.1×10^4 , 8.4×10^4 , 12×10^4 . Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk Re 2.1×10^4 , penambahan *guide vane* dapat dikatakan menguntungkan karena dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi. Namun pada saat Re dinaikkan pada 8.4×10^4 dan 12×10^4 , penambahan *guide vane* menjadi merugikan karena meningkatkan *pressure drop* dibandingkan tidak menggunakan *guide vane*.

Penelitian lain dilakukan oleh **Danbon & Sollicc (2000)** tentang *elbow* 90° yang ditambahkan sebuah damper yang berupa *butterfly valve* setelahnya. Hasil pengujian menjelaskan adanya perbedaan profil kecepatan antara saluran yang memakai *damper* dan tidak ada *damper*.

Selain itu adapun penelitian yang dilakukan **Wawan dkk (2014)** yang mengkaji tentang penurunan *pressure drop* pada penempatan *circular disturbance body* di depan *circular cylinder* dalam saluran berbentuk *rectangular*. Penelitian ini bertujuan untuk menunda titik separasi yang terjadi pada *circular cylinder* sehingga dapat menurunkan gaya *drag* dan *pressure drop*. Penelitian dilakukan pada diameter *circular cylinder* (D) 25mm dan 37.5mm. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan *circular disturbance body* dapat menurunkan gaya *drag* dan *pressure drop* tetapi hanya efektif pada sudut 20° dan 30° untuk D=25mm, dan 20° , 30° , dan 40° untuk D=37.5mm. Berdasarkan hasil tersebut penulis bertujuan untuk menerapkan penggunaan *circular disturbance body* pada *elbow* 90° dengan harapan dapat menurunkan *pressure drop* yang terjadi disaluran *elbow* 90° .

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan penambahan *guide vane* dan *damper* dalam *elbow* ternyata belum cukup untuk menurunkan nilai *pressure drop* secara signifikan. Penelitian lain telah dilakukan pada sebuah *circular cylinder* yang

dipasangi *circular disturbance body* ternyata dapat menunda titik separasi sehingga dapat menurunkan nilai *pressure drop*.

Maka hipotesis awal penelitian ini adalah penambahan sebuah *inlet disturbance body* dengan variasi diameter $d/D_h = 0.064, 0.08, \text{ dan } 0.1$ dalam *elbow* 90° dapat melawan *shear layer* dan *advers pressure* sehingga dapat menunda titik separasi yang terjadi pada *elbow* 90° dan dapat menurunkan *pressure drop*. Untuk meyakinkan hal tersebut maka diperlukan analisa lebih dalam mengenai *pressure drop* sisi *inlet* dan *outlet* saluran *square duct*, *pressure drop* pada sisi *inlet* dan *outlet elbow* serta *loss coefficient elbow* 90° , *pressure coefficient* pada *elbow*, dan bentuk profil kecepatan pada *downstream* saluran *square duct*.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan berdasarkan batasan-batasan masalah supaya pembahasan dalam penelitian ini tidak melampaui tujuan awal. Maka penelitian dilakukan pada asumsi berikut ini :

1. Fluida kerja yang digunakan memiliki karakteristik kecepatan *uniform* pada sisi *inlet*, *incompressible*, *viscous*, dan *steady*.
2. Kekasaran dinding diabaikan.
3. Aliran termasuk dalam region turbulen yaitu $Re > 4000$.
4. Temperatur fluida konstan dan perpindahan panas akibat gesekan diabaikan.
5. Penelitian menggunakan bilangan *Reynolds* pada sisi upstream sebesar $Re_{Dh} = 8,19 \times 10^4$ untuk mengukur intensitas turbulensi dan profil kecepatan aliran.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *inlet disturbance body* dengan kelengkungan *elbow* 90° pada saluran bujur sangkar (*square duct*) yang

divariasikan pada besar diameter *inlet disturbance body*, yaitu pada $d/D_h = 0.064, 0.08, \text{ dan } 0.1$. Berdasarkan tujuan umum diatas maka diperlukan adanya tujuan khusus untuk mengetahui karakteristik aliran pada saluran *square duct*, yaitu :

1. Mengetahui *pressure drop* pada sisi *inlet* dan *outlet* saluran *square duct*.
2. Mengetahui perbedaan *pressure drop* pada sisi *inlet* dan *outlet elbow 90°*, serta *loss coefficient elbow 90°* jika tanpa dan dengan dipasang *inlet disturbance body*.
3. Mengetahui *pressure coefficient* pada *elbow 90°* dengan bilangan *Reynolds* sebesar 3.97×10^4 , 8.19×10^4 , dan 1.39×10^5 .
4. Mengetahui bentuk profil kecepatan *downstream duct* pada bidang vertikal dan horizontal, serta intensitas turbulensi pada bagian *outlet elbow 90°*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini adapun manfaat yang diharapkan dapat digunakan sebagai referensi yaitu sebagai berikut :

1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* antara *upstream* dan *downstream square duct*, *pressure drop*, dan *loss coefficient elbow 90°* tanpa bodi pengganggu dan dengan bodi pengganggu, dan *pressure coefficient* pada *elbow 90°* dengan bilangan *Reynolds* 3.97×10^4 sampai 1.39×10^5 .
2. Memberikan informasi tentang fenomena perbedaan profil kecepatan *downstream duct* pada posisi vertikal dan horizontal.
3. Memberikan informasi besar diameter yang paling efektif ketika dilakukan penambahan *inlet disturbance body*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang teori-teori yang merujuk pada penelitian yang akan dilakukan serta dilengkapi dengan referensi mengenai penelitian-penelitian lain yang mendukung.

2.1 Karakteristik Fluida

Percobaan yang dilakukan akan menggunakan udara sebagai fluida kerja yang memiliki *viscositas* dan *densitas*. Berikut penjelasan mengenai masing-masing karakteristik tersebut :

2.1.1 Viskositas

Viskositas adalah fenomena yang terjadi akibat adanya gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida sehingga berhubungan dengan *gradient* kecepatan. Ada dua bentuk viskositas yaitu :

1. Viskositas Dinamis (μ)

Viskositas ini merupakan rasio antara tegangan geser dengan laju perubahan dan besarnya sangat dipengaruhi oleh perubahan temperatur.

2. Viskositas Kinematik (ν)

Viskositas kinematik merupakan perluasan dari viskositas dinamik yang dibagi dengan densitas massanya.

2.1.2 Densitas (ρ)

Pada umumnya densitas merupakan rasio massa dengan volume. Densitas sering dikaitkan dengan tekanan (P) dan

temperature (T). Adapun beberapa bentuk densitas sebagai berikut :

1. Densitas Massa

Densitas massa merupakan rasio antara jumlah massa dengan jumlah dan dapat dirumuskan dalam persamaan :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Dimana : m = massa (kg)

V = volume (m^3)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

2. Berat Spesifik γ

Berat spesifik adalah perkalian antara densitas massa dengan gravitasi sehingga dapat dirumuskan:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.2)$$

Dimana : γ = berat spesifik (N/m^3)

g = gravitasi (m/s)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

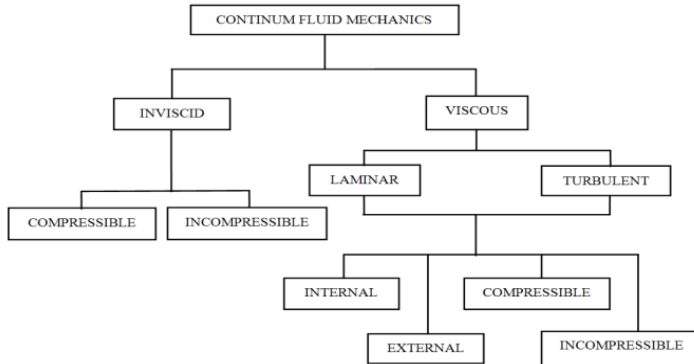
3. *Specific Gravity* (SG)

Specific Gravity didefinisikan sebagai rasio antara berat spesifik suatu fluida dengan berat spesifik air pada temperatur $4^\circ C$. *Specific Gravity* merupakan bilangan tak berdimensi (*dimensionless*).

2.2 Klasifikasi Jenis Aliran fluida

Pendekatan untuk menganalisa karakteristik fluida banyak dilakukan untuk mengetahui partikel fluida itu sendiri. Proses

analisa secara mikroskopis belum dapat menjawab dan sulit dilakukan, sehingga dilakukanlah pendekatan secara makroskopis, karena dianggap sudah memadai. Berdasarkan anggapan tersebut perlu adanya asumsi fluida yang "*continuum*", sehingga seluruh properti fluida merupakan fungsi kedudukan dan waktu.



Gambar 2.1 Klasifikasi jenis fluida (Fox dan Mc. Donald, 1998)

2.2.1 Aliran *Viscous*

Aliran *viscous* merupakan aliran yang memiliki viskositas tertentu ($\mu > 0$). Hal ini menjadikan aliran *viscous* dapat menghasilkan tegangan geser ketika aliar tersebut melintasi dan bersinggungan dengan plat datar ataupun dinding yang lainnya.

2.2.2 Aliran *Laminar* dan *Turbulen*

Pada *Continuum Fluid Mechanics* aliran *viscous* dibedakan menjadi dua yaitu aliran *laminar* dan aliran *turbulen*. Penamaan *laminar* ditujukan karena partikel-partikel yang bergerak pada aliran tersebut mengikuti

lintasan yang sejajar dengan dinding dan memiliki kecepatan sama. Pada umumnya terjadi pada kecepatan kecil dengan *viscous* yang besar. Sedangkan aliran dikatakan *turbulen* jika setiap partikel fluida bergerak sembarang di atas dinding dan terjadi pada kondisi yang berkebalikan dengan aliran *laminar*.

Parameter kecepatan dan kekentalan menentukan apakah aliran tersebut *laminar* ataupun *turbulen*. Berdasarkan parameter tersebut, kondisi aliran *laminar* dan aliran *turbulen* dapat dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi yaitu *Reynolds Number*. Namun pendekatan tersebut hanya berlaku pada aliran *incompressible* (penjelasan aliran *incompressible* disubbab berikutnya). Bilangan *reynolds* menggambarkan rasio antara gaya inersia terhadap gaya geser. Sehingga bilangan *reynolds* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.3)$$

Dimana : Re = bilangan *reynolds*
 U_{ref} = kecepatan aliran fluida (m/s)
 D_h = diameter dalam saluran (m)
 μ = viskositas kinematik fluida
 (N.m/s²)

2.2.3 Aliran *Compressible* dan *Incompressible*

Pembagian aliran *laminar* dan aliran *turbulen* memberi penjelasan bahwa aliran dipengaruhi oleh kecepatan dan kekentalan fluida. Berdasarkan pembagian tersebut akan di *breakdown* lagi berdasarkan properti densitas. Aliran *compressible* adalah aliran yang melewati suatu benda padat dan terjadi perubahan temperatur sangat berpengaruh pada densitasnya. Sedangkan aliran *incompressible* merupakan aliran yang berkebalikan

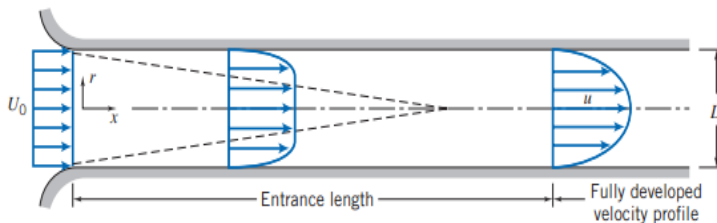
dengan aliran *compressible*, sehingga pengaruh perubahan temperatur pada densitas dapat diabaikan. Adapun cara untuk membedakan kedua aliran tersebut, yaitu dengan perhitungan menggunakan bilangan Mach (M).

$$M = \frac{\bar{V}}{c} \quad (2.4)$$

Dimana : M : bilangan Mach
 \bar{V} : kecepatan rata-rata aliran
 c : kecepatan rambat suara

2.3 Fenomena Aliran di dalam Saluran

Beberapa fenomena yang terjadi pada sebuah saluran telah menjadi topik penting dalam penelitian. Hasil-hasil penelitian tersebut memunculkan istilah-istilah fenomena yang terjadi di dalam saluran. Sebagai contoh fenomena yang terjadi pada saluran lurus dengan panjang tertentu akan membentuk aliran yang *fully develop flow* setelah *boundary layer* dinding atas dan bawah bertemu.



Gambar 2.2. Profil kecepatan aliran dalam saluran lurus (Fox dan Mc. Donald, 1998)

Gambar diatas menunjukkan bahwa ketika aliran *viscous* masuk ke dalam saluran dengan kecepatan tertentu dan bentuk aliran yang uniform, maka pada dindingnya akan membentuk lapisan

batas(*boundary layer*). Lapisan tersebut akan bertemu pada suatu titik tertentu sehingga akan mengubah aliran menjadi bentuk *fully develop flow* sesuai dengan gambar tersebut.

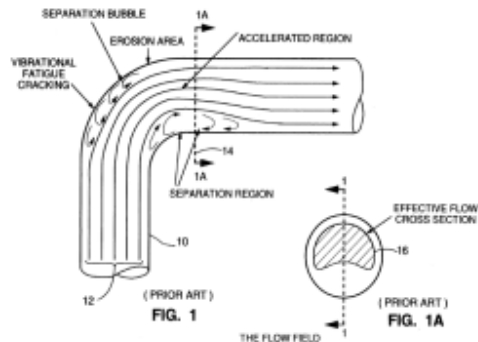
Namun sekarang para peneliti sudah beralih pada fenomena yang terjadi pada saluran lengkung (*elbow*). Pada sistem *elbow* sering terjadi penurunan tekanan yang cukup besar atau biasa disebut *pressure drop*. *Pressure drop* muncul karena adanya aliran separasi dan *secondary flow*. Kedua fenomena tersebut sering menjadi topik utama dalam proses pengurangan *pressure drop*. Berikut akan dibahas penyebab terjadinya kedua fenomena tersebut.

2.3.1 Separasi

Fenomena separasi terjadi di dalam *elbow* karena ketidakmampuan aliran tersebut untuk melawan *adverse pressure gradient*. *Adverse pressure gradient* adalah kenaikan tekanan yang terjadi pada dinding *elbow* baik di *inner wall* maupun *outer wall*. Kenaikan tekanan pada sisi *outer wall* diakibatkan oleh radius kelengkungan *elbow*. Kenaikan tekanan berbanding lurus dengan bertambahnya besar radius kelengkungan *elbow*. Sedangkan separasi aliran pada *inner wall* disebabkan gaya inersia yang terjadi. Separasi dapat menyebabkan aliran berbalik arah dari aliran utamanya (*backflow*). Momentum aliran rendah sehingga aliran akan terjebak dan membentuk *vortex flow* pada sisi *corner elbow*. Sebagai contoh *vortex* yang terjadi pada *rectangular elbow* 90° disebabkan oleh adanya interaksi *boundary layer* dan *endwall* yang berkembang pada dinding.

Beberapa penelitian dilakukan untuk mengamati fenomena separasi pada *elbow*, salah satunya penelitian yang dilakukan oleh **Cheng(1994)**. Penelitiannya dilakukan dengan menginjeksikan cairan berwarna pada

pipa transparan untuk memperoleh ilustrasi streamline di dalam *elbow*. Hasil penelitiannya dapat digambarkan sebagai berikut :



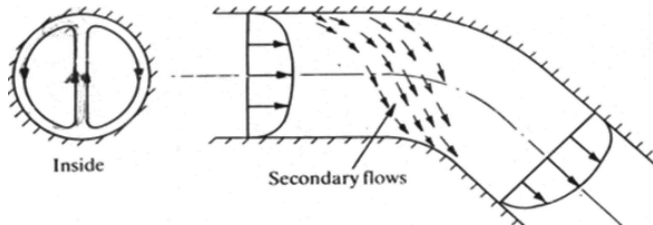
Gambar 2.3. Separasi aliran pada *curved pipe* (Cheng, 1994)

Gambar diatas menunjukkan bahwa adanya separasi aliran di sisi *inner* dan *outer wall elbow*. Separasi aliran yang terjadi pada sisi *inner wall* dan *outer wall* menyebabkan *effective flow area* berkurang.

2.3.2 Aliran Sekunder

Pada *elbow* juga terjadi aliran sekunder yang disebabkan oleh perbedaan distribusi energi pada sisi *inner wall* dan *outer wall*. Perbedaan tersebut muncul karena adanya perbedaan pada daerah kedua sisinya. Hal itu akibat distribusi tekanan statis bagian luar semakin besar. Kondisi tersebut sesuai dengan persamaan Euler pada koordinat normal *streamline* yang menyatakan bahwa besarnya radius kelengkungan sangat menentukan besarnya tekanan.

Pada belokan pipa *secondary flow* di dalam *elbow* dapat dilihat dengan jelas pada sisi *cross section*. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.4. *Secondary flow* (Miller,1990)

Gambar di atas merupakan penelitian yang dilakukan oleh **Miller(1990)**. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui gaya sentrifugal di sisi *inner* dan *outer wall* yang terjadi pada aliran yang melintasi saluran lengkung.

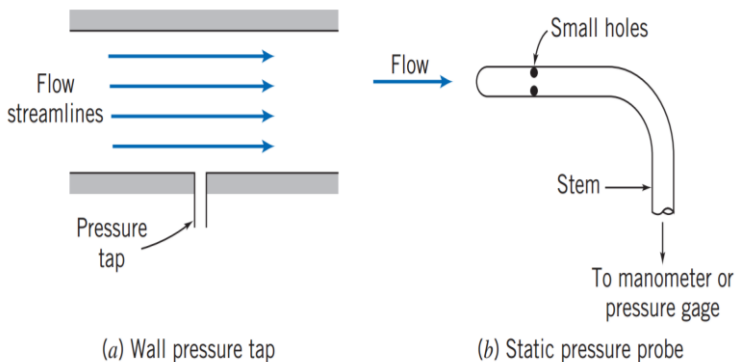
2.4 Tekanan (P)

Pada dasarnya fluida mengalir dari tekanan yang lebih tinggi menuju tekanan yang lebih rendah. Dari pernyataan di atas menunjukkan bahwa tekanan sangat erat kaitannya dengan aliran fluida. Pada persamaan Bernoulli dijelaskan bahwa tekanan dapat dibangun dari persamaan dari energi, yaitu sebagai berikut :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad (2.5)$$

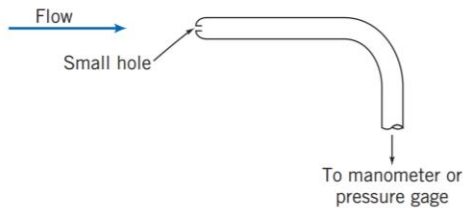
Tekanan yang digunakan pada persamaan Bernoulli adalah tekanan termodinamik atau biasa disebut tekanan statis. Tekanan statis merupakan tekanan yang diukur oleh alat ukur pada kecepatan yang sama dan bergerak mengikuti pergerakan aliran. Tekanan statis dapat diukur dengan alat *wall pressure tap* yang ditempatkan

di daerah dengan kondisi aliran *streamline* lurus, seperti pada gambar 2.5. Pengukuran menggunakan *pressure tap* dilakukan jika lubang *pressure tap* tegak lurus dengan dinding suatu saluran dan tidak terdapat kotoran pengganggu. Sedangkan akurasi pengukuran statis dapat diperoleh dengan menggunakan *pressure probe* (gambar 2.5). Pengukuran tersebut dilakukan jika fluida yang mengalir jauh dari dinding dan bila *streamline*-nya berbentuk kurva.



Gambar 2.5 Pengukuran tekanan statis menggunakan *pressure tap* (a), *pressure probe* (b) (Fox dan Mc. Donald, 1998)

Selain tekanan statis juga terdapat tekanan stagnasi, yaitu tekanan yang dapat diukur jika aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol tanpa adanya gesekan. Pengukuran tekanan stagnasi dapat dilakukan dengan alat *probe* atau biasa dikenal dengan *pitot tube*. Pemasangan alat tersebut harus berhadapan langsung dengan arah datangnya aliran dan daerah pengukurannya sejajar dengan arah aliran lokal (gambar 2.6).



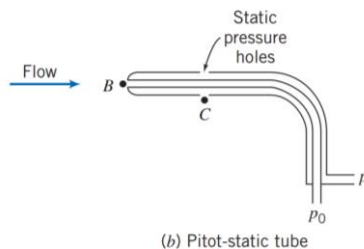
Gambar 2.6. Alat ukur *pitot tube* untuk tekanan stagnasi (Fox dan Mc. Donald, 1998)

Berdasarkan persamaan Bernoulli didapatkan persamaan yang memuat tekanan statis (p) dan tekanan stagnasi (p_o), berikut persamaan tersebut :

$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.6)$$

Dari persamaan tersebut muncul tekanan lain yaitu tekanan dinamis, tekanan dinamasi bdirumuskan dengan $\frac{1}{2} \rho V^2$.

Pengukuran tekanan statis dan stagnasi juga dapat dilakukan secara bersamaan salah satunya menggunakan *pitot static tube*. Pada umumnya pengukuran ini bisa disebut pengukuran tekanan total seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Pengukuran Tekanan Total.

2.6 Head Loss

Head loss adalah kerugian yang diberikan peralatan pada suatu instalasi baik pada perpipaan maupun pada instalasi lainnya. Aksesoris pada instalasi seperti *valve*, *fitting*, dan sejenisnya memberikan pengaruh kerugian dengan nilai yang berbeda pada masing-masingnya. *Head loss* dapat menyebabkan kerugian pada sisi energi, karena daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan aliran semakin besar.

Persamaan Bernoulli pada fluida menggambarkan keseimbangan energi, dengan memperhitungkan kerugian-kerugian energi yang terjadi di dalam persamaan tersebut.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \sum H_{L_T} \quad (2.7)$$

Dimana : P = Tekanan statis (Pa)

\bar{V} = Kecepatan aliran $\left(\frac{m}{s}\right)$

z = Ketinggian fluida (m)

ρ = Massa jenis fluida $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

g = Percepatan gravitasi $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

H_{L_T} = Head loss total (m)

Pada umumnya *head loss* terbagi menjadi dua yaitu *head loss mayor* dan *head loss minor*. Berikut adalah penjelasan dari kedua *head loss* tersebut :

2.6.1 Head Loss Mayor

Head losses mayor adalah besar nilai kehilangan energi yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida dengan dinding pipa lurus

yang mempunyai luas penampang yang sama. Dalam perhitungannya *head loss mayor* dibedakan menurut jenis alirannya, yaitu

1) Laminar

Untuk aliran laminar, berkembang penuh pada pipa horisontal, maka *head loss* dapat dihitung dengan rumus :

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2.8)$$

Dimana: h_l = head losses mayor (m)

2) Turbulen

Head losses mayor untuk aliran turbulen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.9)$$

Dimana f (koefisien gesek) didapat dari hasil eksperimen dan dipengaruhi oleh bilangan Reynolds (Re) dan kekasaran permukaan relatif $\left(\frac{L}{D} \right)$.

2.6.2 Head Loss Minor

Head losses minor adalah besar nilai kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan penambahan aksesoris instalasi seperti *valve*, *fiting*, sehingga dapat mengakibatkan perubahan luas penampang . Kerugian ini dapat diketahui dari persamaan:

$$h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.10)$$

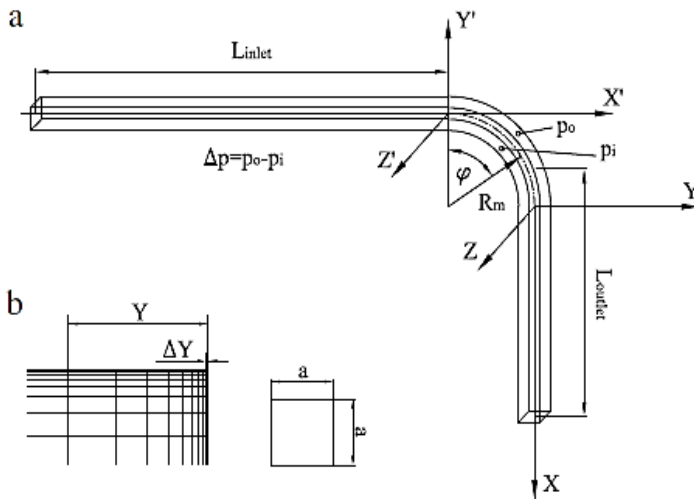
Dimana: h_{lm} = head losses minor (m)

K = konstanta dari masing-masing

aksesoris.

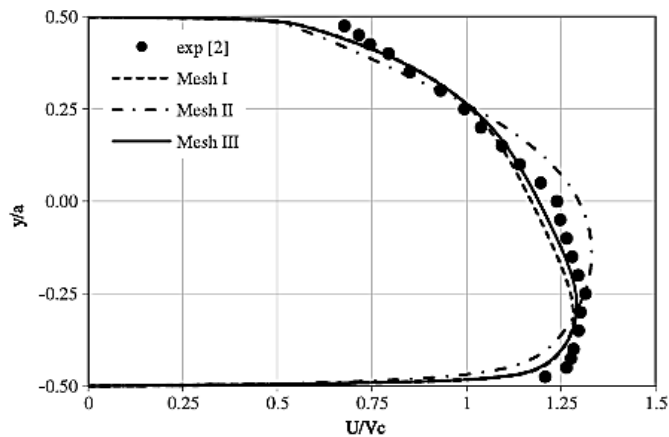
2.7 Karakteristik Aliran Melalui *Rectangular Duct Elbow 90°*

Pengamatan karakteristik aliran melalui *rectangular duct* sudah mulai dilakukan salah satunya Analisa secara simulasi dan eksperimen oleh **Rup dan Sarna (2011)**. Simulasi yang dilakukan menggunakan model *turbulen RSM (Reynolds Stress Model)* pada $Re = 40000$ dengan geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $Dh = 80$ mm, dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20Dh = 1600$ mm (Gambar 2.8). Variasi dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah *mesh* $V_k = 553052$, $V_k = 1766079$, $V_k = 1034775$.

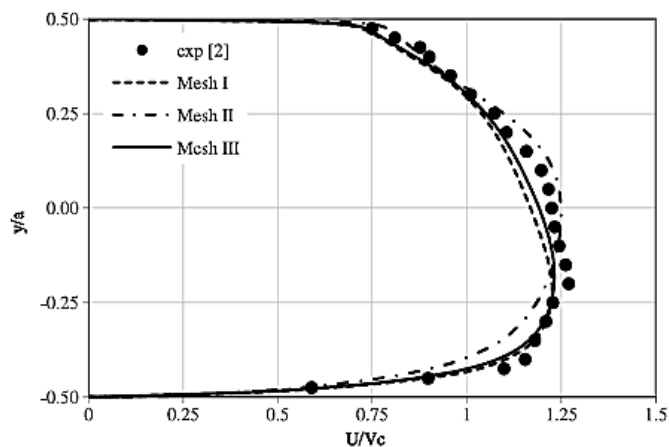


Gambar 2.8. a). Posisi pengambilan data pada domain uji b).
Mesh pada volume (Rup dan Sarna : 2011)

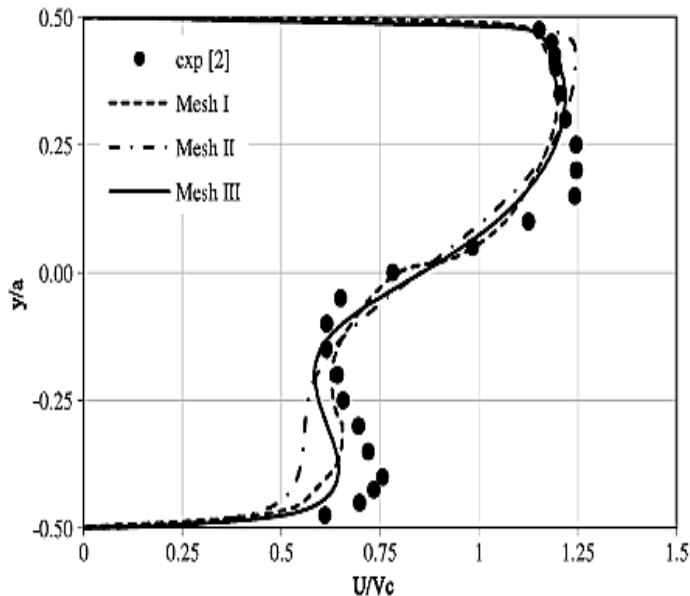
Berdasarkan hasil eksperimen dan hasil simulasi, didapatkan perbandingan profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*. Hasil tersebut dapat dilihat pada gambar 2.9 dan 2.10.



Gambar 2.9.a. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen $\phi = 30^\circ$ ($z/Dh = 0.0$) (Rup dan Sarna : 2011)



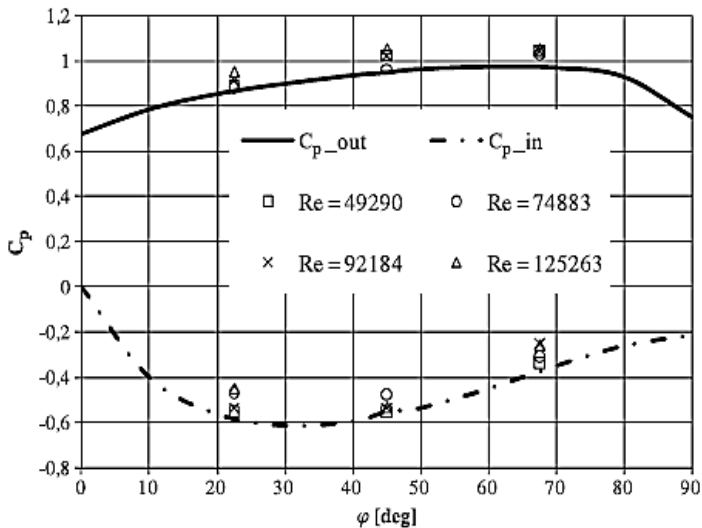
Gambar 2.9.b. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen $\phi = 60^\circ$ ($z/Dh = 0.0$) (Rup dan Sarna : 2011)



Gambar 2.9.c. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $z/Dh = 1.0$ dan $z/Dh = 0.0$ (**Rup dan Sarna : 2011**)

Pada gambar 2.9 dan 2.10 dapat dilihat bahwa hasil simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada $\phi = 30^\circ$ dan 60° . Sedangkan pada gambar 2.11 terdapat perbedaan hasil profil kecepatan pada lokasi $x/Dh = 1.0$ dan $z/Dh = 0.0$, hanya pada *mesh* III yang mendekati hasil eksperimen.

Berdasarkan gambar 2.12 didapatkan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada *elbow*, yaitu koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$). Perbedaan tekanan tersebut menjadi parameter untuk menentukan besar *koefisien losses* pada *elbow*.



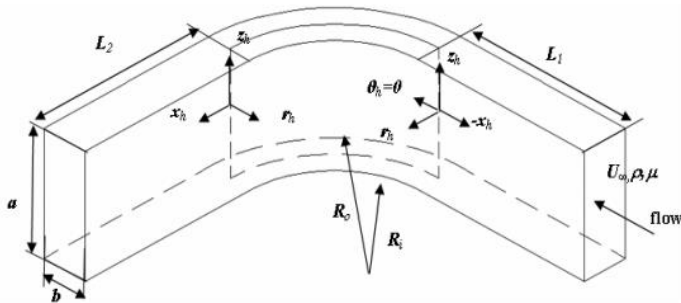
Gambar 2.10. Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi inner dan outer wall elbow hasil simulasi dan eksperimen (Rup dan Sarna : 2011)

2.8 Penelitian Terdahulu

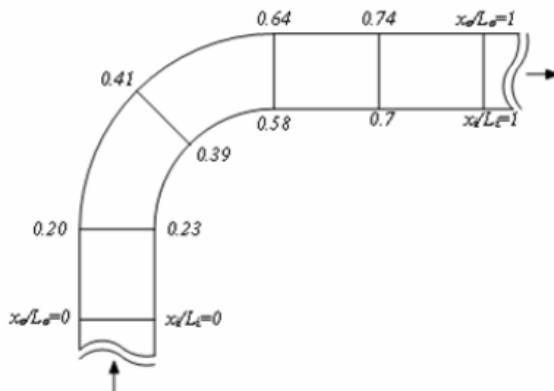
Penelitian yang dilakukan berdasarkan rujukan dari penelitian-penelitian yang sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Penelitian tersebut digunakan sebagai dasar hipotesa awal untuk melakukan penelitian, berikut beberapa penelitian tersebut :

2.8.1 Penelitian pada *Rectangular Elbow 90°* dengan Penambahan *Guide Vane*

Penelitian ini bertujuan untuk mengamati pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop*. Penelitian ini dilakukan oleh Sutardi dkk (2010) pada variasi *reynolds number* 2.1×10^4 , 8.4×10^4 , dan 12×10^4 .



(a)

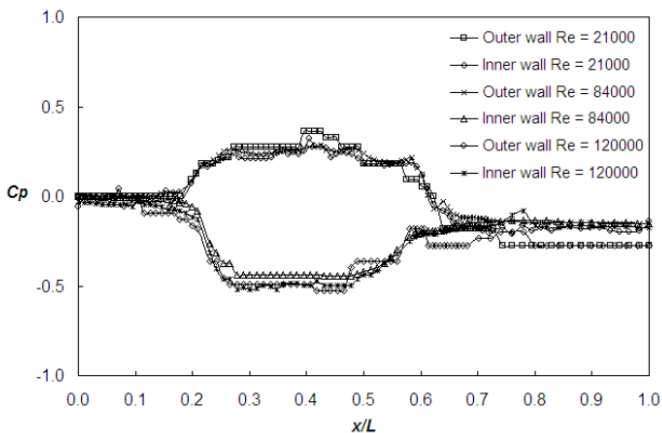


(b)

Gambar 2.11. (a) Bentuk geometri *elbow* **(b)**Lokasi pengukuran kecepatan (Sutardi dkk, 2010)

Gambar 2.13 adalah posisi pengukuran pada *test section*, pengukuran tersebut digunakan untuk mendapatkan gambaran bentuk C_p (*coefisien of pressure*) dan juga *pressure drop*. Pada penelitian tersebut diamati *wall pressure coefficient* (C_p) yang

diplot berdasarkan fungsi *reynolds number* (Re_{Dh}) dan jumlah *guide vane*. Kemudian diamati distribusi C_p pada *inner* dan *outer elbow* (gambar 2.14), distribusi tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan pada *static wall pressure* antar kedua sisi tersebut. Jika diamati pada grafik tersebut, distribusi C_p pada sisi *inner* bernilai negatif yang menunjukkan tekanan pada sisi *inner* lebih rendah dari pada tekanan daerah *freestream*. Sedangkan pada sisi *outer* bernilai positif sehingga nilai tekanannya lebih tinggi dari tekanan *freestream*.



Gambar 2.12 Distribusi C_p pada sisi *inner* dan *outer elbow* (Sutardi dkk, 2010)

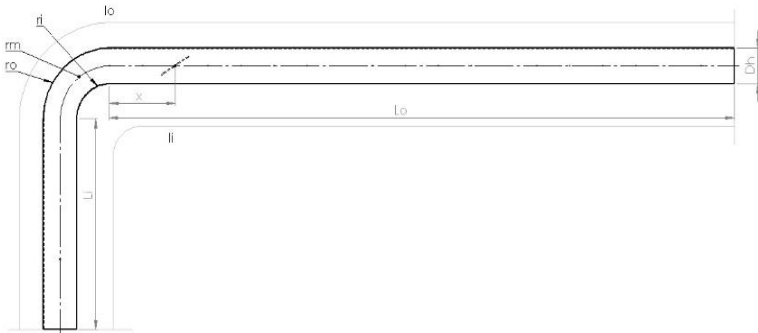
Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan didapatkan table 2.1, sehingga dari table tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan *guide vane* baik 1, 2, 3 dapat menurunkan *pressure drop* hingga 33.42%, 31.92, dan 32.42% pada *Reynold number* yang rendah. Sedangkan pada *reynolds number* yang tinggi penambahan *guide vane* justru meningkatkan *pressure drop*.

Table 2.1 Pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop*. (Sutardi dkk, 2010)

Re, D_h	Number of Guide Vanes	Δp (N/m ²)	Δp (%)
21000	0	4.01	-
	1	2.67	-33.42%
	2	2.73	-31.92%
	3	2.71	-32.42%
84000	0	36.07	-
	1	37.40	3.69%
	2	51.12	41.72%
	3	74.59	106.79%
120000	0	79.11	-
	1	88.66	12.07%
	2	118.22	49.44%
	3	-	-

2.8.2 Penelitian Eksperimen tentang Aliran melalui *Suare Duct* dan *Square Elbow 90°* Dengan Variasi Sudut Bukaannya *Damper*

Pemasangan *elbow 90°* dan *damper (valve)* dapat meningkatkan koefisien *losses* dan *pressure drop* disepanjang aliran melalui pipa. Pada penelitian yang dilakukan **Eduard (2016)** bertujuan untuk mengetahui *pressure loss* sepanjang saluran udara, koefisien *loss minor elbow 90°* dan koefisien *loss minor volume damper*. Penelitian dilakukan pada *square duct* dengan diameter $D_h = 125\text{mm}$ dan *square elbow 90°* dengan $r_m/D_h = 1.5$ (Gambar 2.15). Pada pengamatan profil kecepatan udara yang masuk memiliki nilai $Re = 7.88 \times 10^4$ dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° . Sedangkan pada pengukuran *pressure drop* dilakukan pada variasi Re_{D_h} antara 3.94×10^4 sampai 10^5 dan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° .

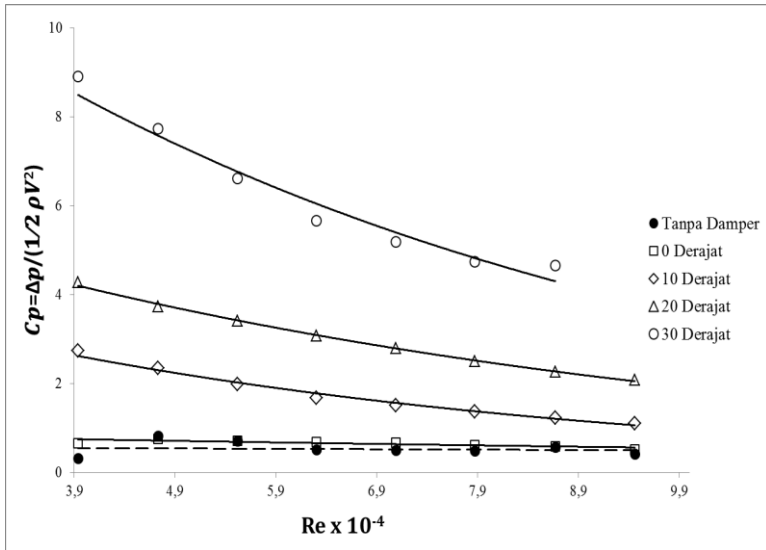


Gambar 2.13 Sketsa *Square Ducting* pada pandangan atas
(Eduard : 2016)

Keterangan :

- L_m (panjang total garis tengah streamline elbow 90°) : 2973,125 mm
- l_i (panjang total inner searah streamline elbow 90°) : 3169,375 mm
- l_o (panjang total outer searah streamline elbow 90°) : 3267,5 mm
- L_i (upstream straight channel) : 750 mm
- L_o (downstream straight channel) : 2125 mm
- r_m (centerline elbow 90° radius) : 187,5 mm
- r_i (inner radius) : 125 mm
- r_o (outer radius) : 250 mm
- a (tinggi damper) : 125 mm
- b (lebar damper) : 125 mm
- D_h (diameter hidrolis) : 125 mm
- x (jarak dari outlet elbow 90° dengan damper): 250 mm

Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan grafik seperti pada gambar 2.16 yang merepresentasikan pengaruh sudut bukaan damper terhadap *Coefisien of pressure* (C_p).



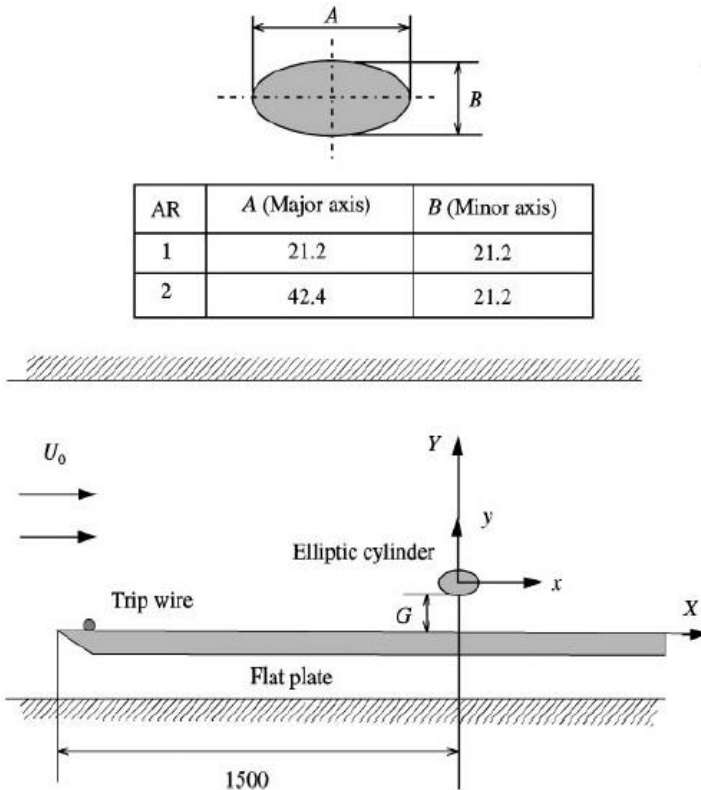
Gambar 2.14 Grafik C_p pada $Reynolds\ number\ 3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ dan variasi sudut bukaan *damper* $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ dan 30°

Grafik diatas menunjukkan bahwa penambahan nilai Re dapat menurunkan nilai C_p di semua sudut bukaan *damper*. Hal itu menandakan bahwa dengan meningkatnya kecepatan udara pada saluran dapat meningkatkan nilai *pressure drop*, sehingga semakin menurunnya nilai C_p menandakan semakin meningkatnya nilai *pressure drop* pada nilai kecepatan yang tinggi. Dari seluruh variasi sudut bukaan *damper* dapat disimpulkan bahwa pada sudut bukaan 0° memiliki nilai *pressure drop* yang rendah, sedangkan pada sudut bukaan 30° memiliki nilai *pressure drop* yang tinggi.

2.8.3 Penelitian Eksperimen tentang Pengaruh Sebuah Silinder yang Diletakkan Dekat Dinding Plat Datar

Eksperimen ini meninjau karakteristik aliran pada daerah sekitar silinder yang diletakkan dekat dinding tersebut dengan memvariasikan rasio *gap* (G/B) antara silinder dengan plat.

Silinder yang digunakan dalam eksperimen ini adalah silinder sirkular dan *elips*, serta berurutan mempunyai rasio *axis* $AR = 1$ dan 2.



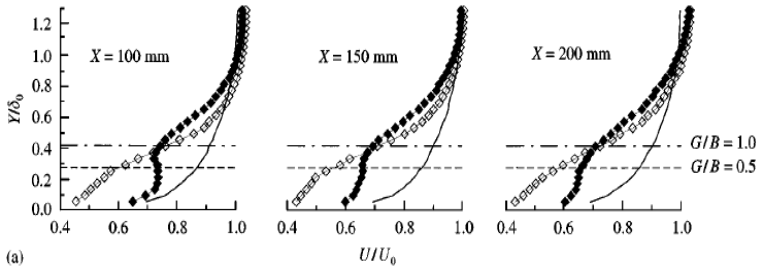
Gambar 2.15 Bentuk Geometri Silinder *Elips* dan Skema Penelitian (Choi & Lee, 2010)

Choi & Lee (2010) melakukan eksperimen pada sebuah *wind tunnel* dengan tinggi 0,6 m, lebar 0,72 m, dan panjang 6 m. Intensitas turbulensi *free-stream* pada bagian uji kurang dari 0,08% pada 10 m/s. Gambar 2.18 menunjukkan bentuk geometri silinder

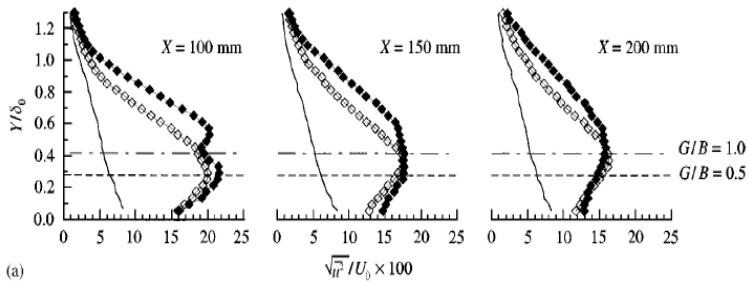
elips dan skema peralatan yang digunakan pada eksperimen ini. Sebuah plat datar dengan ketebalan 15 mm dan panjang 4,8 mm dipasang 100 mm diatas bagian permukaan dari bagian uji, dimana pada bagian depan plat datar tersebut berbentuk runcing membentuk sudut 30° . Silinder *elips* diletakkan pada 1,5 m dari bagian depan plat datar tersebut. Selain itu, juga ditambahkan sebuah kawat pengganggu pada plat datar tersebut dengan diameter 3,5 mm yang diletakkan sejauh 100 mm dari bagian ujung plat. *Boundary layer* terbentuk di atas bidang datar memiliki ketebalan 75 mm pada lokasi silinder. Selama eksperimen, kecepatan *free-stream* (U_o) telah ditetapkan pada 10 m/s dan menggunakan *Reynolds Number* sesuai dengan tinggi dari penampang silinder yang digunakan, yaitu $1,4 \times 10^4$.

Dari eksperimen ini didapatkan bahwa untuk rasio *gap* yang kecil yaitu kurang dari $G/B = 0,5$, *drag coefficient* dari silinder *elips* ($AR = 2$) meningkat secara perlahan seiring dengan peningkatan rasio *gap*. Selain itu, *drag coefficient* dari silinder sirkular meningkat secara cepat. Darisini dapat dilihat bahwa *drag coefficient* dari silinder *elips* adalah setengah dari silinder sirkular yang memiliki tinggi sama sebagai diameter silinder. Ketika silinder memiliki rasio *gap* $G/B = 0$, silinder tersebut memiliki *lift coefficient* positif. Untuk rasio *gap* kurang dari $G/B = 0,5$ silinder *elips* memiliki *lift coefficient* yang lebih tinggi daripada silinder sirkular. Seiring dengan bertambahnya rasio *gap*, *lift coefficient* menurun dan konvergen menuju ke angka nol.

Gambar 2.18 menunjukkan *streamwise velocity profile* yang diukur pada $X = 100, 150$, dan 200 mm, serta *velocity profile* tanpa silinder. Dari situ, didapati bahwa pada silinder *elips* *vortex* terjadi di daerah mendekati *wake* ketika rasio *gap* lebih besar dari *critical value*, yaitu $G/B = 0,4$ dimana seiring menurunnya rasio *gap*, frekuensi *vortex* juga tiba-tiba mengalami penurunan.



Gambar 2.16 Mean streamwise velocity profiles pada $X = 100$, 150 , dan 200 mm; $AR = 1$; — tanpa silinder; \diamond $G/B = 0,5$; \blacklozenge $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)



Gambar 2.17 Streamwise turbulence intensity pada $X = 100$, 150 , dan 200 mm; $AR = 1$; — tanpa silinder; \diamond $G/B = 0,5$; \blacklozenge $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)

Gambar 2.19 menunjukkan intensitas turbulensi pada daerah wake silinder sirkular semakin meningkat jika dibandingkan dengan plat datar tanpa silinder sirkular. Semakin menjauhi daerah wake silinder sirkular, intensitas turbulensi semakin berkurang. Intensitas turbulensi yang ditimbulkan oleh silinder sirkular dengan $G/B = 1,0$ lebih kuat jika dibandingkan dengan $G/B = 0,5$.

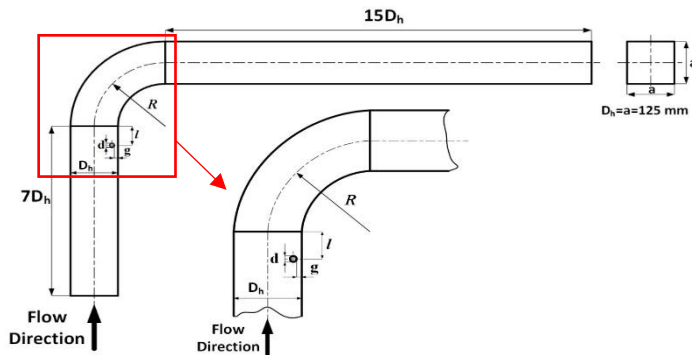
BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan bab yang memuat skema dan prosedur penelitian yang digunakan. Pada penelitian ini digunakan metode penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square duct* dan *square elbow 90°* dengan variasi diameter peletakan *Inlet Circular Disturbance Body* yang terletak pada daerah *inner upstream* sebelum *inlet elbow 90°*, dengan besar variasi $d/D_h = 0.064, 0.08, 0.1$.

3.1 Skema Penelitian

Instalasi penelitian berupa benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung seperti *honey comb*, *square duct*, *square elbow 90°*, *centrifugal fan* dan *connector*. *Inlet circular disturbance body* dipasang pada sisi *inner upstream straight channel* dengan jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0,2 D_h$, dan variasi diameter $d = 0.064 D_h, 0.08 D_h, 0.1 D_h$ sebelum *inlet elbow 90°*. Skema instalasi penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1.



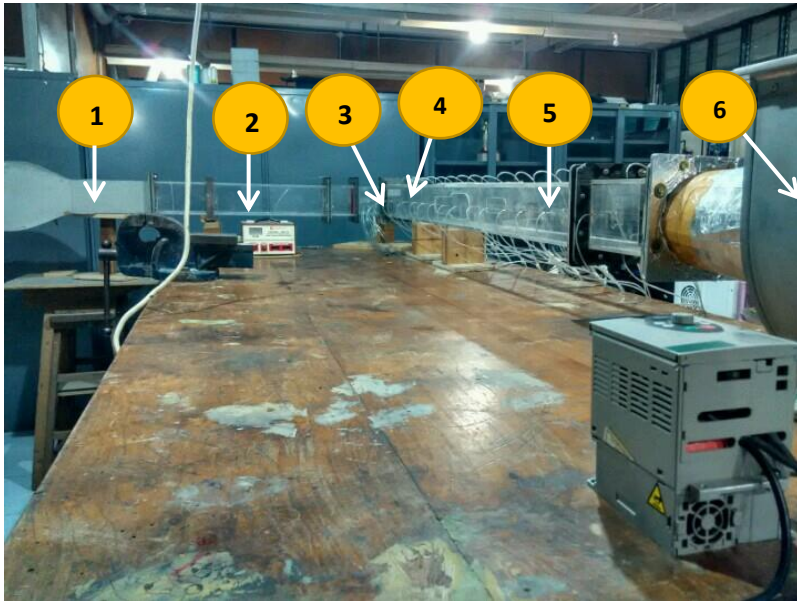
Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakan *inlet circular disturbance body*

3.2 Peralatan Pendukung

3.2.1 *Square Ducting*

Penelitian menggunakan *square ducting* dan *square elbow 90°* ini dimaksudkan untuk dapat menguji benda dalam skala model. Hal ini disebabkan pengukuran dengan skala sebenarnya cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Oleh sebab itu, dibuatlah *square ducting* dan *square elbow 90°* dengan pembuatan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasilnya cukup akurat dan memadai.

Square ducting yang digunakan dalam percobaan ini adalah jenis *open circuit*, dimana udara yang dialirkan dalam *ducting* langsung bebas dilepas ke udara bebas setelah melalui *work section*.



Gambar 3.2 Model uji penelitian

- Keterangan :
1. *Nozzle*
 2. *Upstream Straight Channel*
 3. *Inlet Circular Disturbance Body*
 4. *Square Elbow 90°*
 5. *Downstream Straight Channel*
 6. *Centrifugal Fan*

Spesifikasi *Square Ducting* :

- Bentuk Penampang : *Square ducting & square elbow 90°*
- Bahan : Akrilik
- Tebal : 8 mm
- L_m (panjang total garis tengah *streamline elbow 90°*) : 2975 mm
- l_i (panjang total *inner* searah *streamline elbow 90°*) : 3170 mm
- l_o (panjang total *outer* searah *streamline elbow 90°*) : 3268 mm
- l (jarak dari *inlet elbow 90°* dengan *cylinder*) : 12,5 mm
- L_i (upstream straight channel) : 875 mm
- L_o (downstream straight channel) : 2000 mm
- r_m (*centerline elbow 90° radius*) : 188 mm
- r_i (*inner radius*) : 125 mm
- r_o (*outer radius*) : 250 mm
- D_h (diameter hidrolik) : 125 mm
- g (*gap* dari dinding inner) : 2.5 mm

3.2.2. *Centrifugal Fan*

Pada penelitian ini digunakan 1 buah *centrifugal fan* (gambar 3.3) dengan spesifikasi sebagai berikut:



Gambar 3.3 *Centrifugal Fan*

- Merk : ElexMax Three-Phase Asynchronous Motor
- Type : 71M4 – 4 B3
- No : 0221
- Voltage : 220 / 380 Voltage
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 KW
- Putaran : 1350 RPM
- Berat : 8,7 kg

3.2.3. *Honey Comb, Screen dan Nozzle*

Nozzle berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test suction*. Didalam *nozzle* terdapat *screen* dan *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test suction*.



Gambar 3.4 *Nozzle*

3.2.4. *Inlet Circular Disturbance Body*

Dalam eksperimen ini, instalasi saluran udara dipasang *inlet circular disturbance body* yang terletak pada dengan jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0,2 D_h$, dan variasi diameter $d = 0,064 D_h$, $0,08 D_h$, $0,1 D_h$ sebelum inlet *elbow 90°*. Bentuk *inlet disturbance body* adalah silinder dengan panjang D_h dan memiliki diameter 12,5 mm. Pemasangan *single inlet ciecular disturbance body* bisa dilihat pada gambar 3.5 yang menunjukkan detail dari peletakannya.



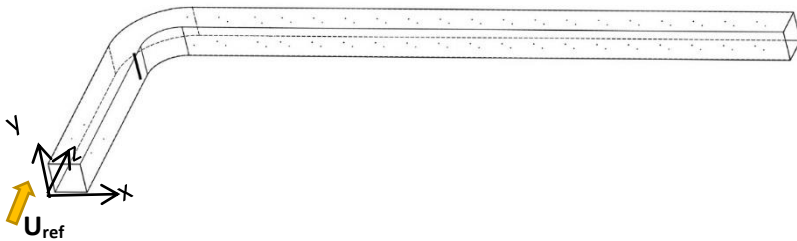
Gambar 3.5 *Inlet Circular Disturbance Body*

3.2.5. *Alat Ukur*

Pada spesimen ini dibutuhkan beberapa alat ukur untuk mendapatkan tekanan statis dan tekanan stagnasi, diantaranya adalah *wall-pressure tap*, *pitot static tube*, *tranducer* dan *manometer inclined*.

1. *Wall-pressure tap*

Wall-pressure tap yaitu lubang–lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau transducer tekanan serta dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji maupun saluran yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.



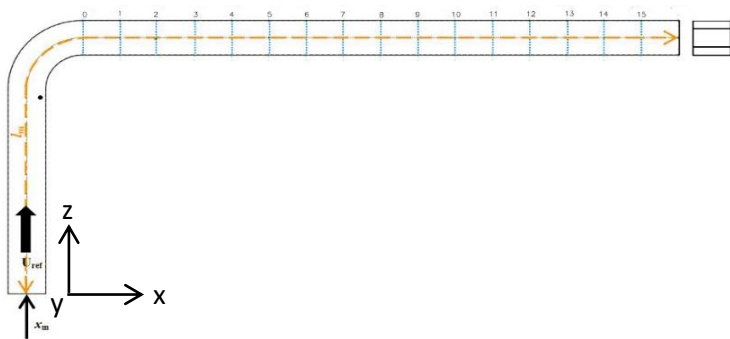
Gambar 3.6 Skema pemasangan *wall pressure tap*

Wall pressure tap dipasang sepanjang *downstream straight channel* mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding *ducting* yang disusun secara paralel pada masing-masing *test section* yang berjarak 125 mm. Titik pengukuran tekanan statis dimulai pada titik yang berjarak 937,5 mm dari *inlet upstream* sampai pada titik yang berjarak 2937,5 mm dari *inlet upstream*. Jumlah *wall pressure tap* disesuaikan dengan kondisi tekanan pada setiap section yaitu dipasang 15 *wall pressure tap*.

2. *Pitot Tube*

Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran tertentu.

Stagnation pitot tube dipasang pada *centerline* tepat sejajar dengan *wall pressure tap*, dimana jarak antar *tap* adalah 125 mm. Untuk mengetahui profil kecepatan aliran, maka *test section* dibagi menjadi 15 *section* yang akan dijadikan posisi peletakan *pitot tube*. Pada gambar 3.7 ditunjukkan beberapa lokasi yang akan diteliti untuk mendapatkan profil kecepatan.



Gambar 3.7 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan

3. Transducer Tekanan dan Data Aquisisi

Berikut spesifikasi *Transducer* yang akan digunakan dalam percobaan ini :

1. Untuk mengukur profil kecepatan
 - Model : PX653 - 01D5
 - Range : $\pm 1''$ WC
 - Akurasi : 0.25 % FS (Fullscale)
 - Output : 1 – 5 VDC
 - Excitation : 12 – 36 VDC
 - Ser.no. : X14500102
2. Untuk mengukur *pressure drop*
 - Model : PX653 - 03D5V
 - Range : $\pm 3''$ WC
 - Akurasi : 0.25 % FS (Fullscale)

Output	: 1 – 5 VDC
Excitation	: 12 – 36 VDC
Ser.no.	: X11450113

4. *Inclined manometer (Manometer V) dan Mistar*

Manometer digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube*. *Manometer* yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar 15° yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan Δh . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.

Gambar 3.8 *Inclined Manometer*



Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosene* ($SG_{\text{kerosene}} = 0,827$)
- Kemiringan : 15°

3.3 Analisa Dimensi Parameter - Parameter yang Dianalisa

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu eksperimen. Hubungan antara parameter yang saling mempengaruhi ditunjukkan dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Dalam skema penelitian

pada gambar 3.1. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran sepanjang *downstream straight channel*.

Δp	: perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m ²)
ρ	: massa jenis fluida (kg/m ³)
μ	: viskositas absolut fluida (kg/(m.s))
U_{ref}	: kecepatan <i>freestream</i> di <i>inlet upstream straight channel</i> (m/s)
u	: kecepatan lokal (m/s)
r_i	: <i>inner radius elbow 90°</i> (m)
r_o	: <i>outer radius elbow 90°</i> (m)
l_i	: panjang total <i>inner</i> searah <i>streamline elbow 90°</i> (m)
l_o	: panjang total <i>outer</i> searah <i>streamline elbow 90°</i> (m)
D_h	: diameter hidrolis saluran (m)
L_i	: panjang <i>upstream straight channel</i> (m)
L_o	: panjang <i>downstream straight channel</i> (m)
y	: aliran searah sumbu koordinat y
z	: aliran searah sumbu koordinat z
x	: aliran searah sumbu koordinat x
d	: diameter <i>inlet circular disturbance body</i>
l	: jarak silinder pengganggu dengan sisi <i>inner</i>
g	: gap silinder dengan dinding <i>square duct</i>

3.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk *Pressure Drop pada Square Ducting*

Pressure drop pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z,) \quad (3.1)$$

dimana ΔP adalah perbedaan tekanan (N/m²)

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak dimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$: koefisien tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak peletakan silinder pada sisi *inner upstream duct* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap* silinder dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$$\frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h} \text{ sehingga} \\ \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h} \right) \quad (3.4)$$

dan untuk *pressure drop* tak berdimensi ($\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2}$) pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2 \left(Re_{D_h}, \frac{d}{D_h} \right) \quad (3.5)$$

3.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada *Square Ducting*

Velocity profile pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga kecepatan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z,) \quad (3.6)$$

dimana u adalah kecepatan lokal (m/s)

Menggunakan Buckingham Pi-theorema dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak dimensi yaitu :

- 1 $\pi_1 = \frac{u}{U_{ref}}$: kecepatan tak berdimensi
- 2 $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*
- 3 $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
- 4 $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak peletakan silinder pada sisi *inner upstream duct* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik

- 5 $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow*
 . 90° dengan diameter hidrolik
- 6 $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap* silinder dari
 . dinding sisi *inner upstream*
 dengan diameter hidrolik
- 7 $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu*
 . x dengan diameter hidrolik
- 8 $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu*
 . y dengan diameter hidrolik
- 9 $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu*
 . z dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.7)$$

$$\frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.8)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$\frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}$ sehingga

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.9)$$

dan untuk kecepatan tak berdimensi $\left(\frac{u}{U_{ref}}\right)$ pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2\left(Re_{D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.10)$$

Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynolds number* konstan yaitu $8,19 \times 10^4$.

3.4 Langkah-Langkah Validasi

Ada beberapa langkah validasi yang perlu dilakukan sebelum pengambilan data, yaitu :

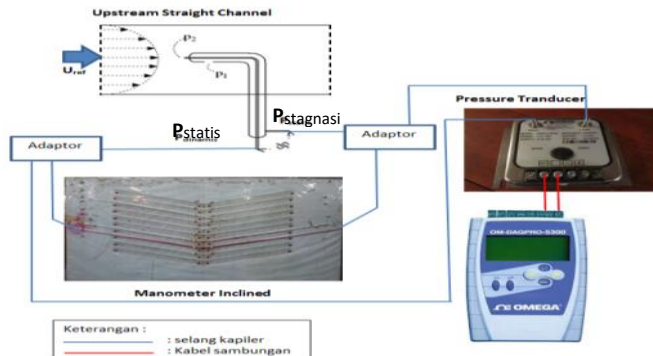
3.4.1 Alat yang digunakan

Peralatan yang dipergunakan pada proses kalibrasi :

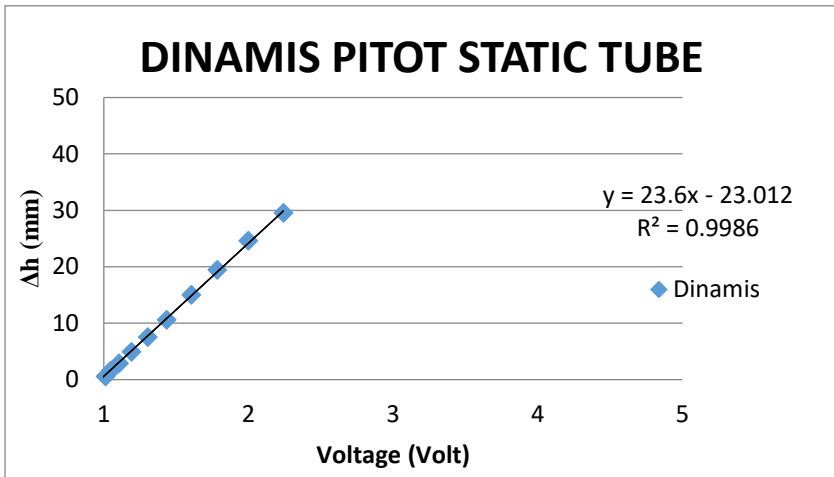
- *Inclined Manometer*
- *Pressure Transducer 1" WC*
- *Pressure Transducer 3" WC*
- *Data Aquisisi DAQ PRO 5300*
- *Pitot Static Tube*

3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *inlet disturbance body*.
2. *Pitot static tube* dipasang pada dinding saluran udara yang tersambung pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer 1" WC* untuk tekanan dinamik.
5. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aqisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



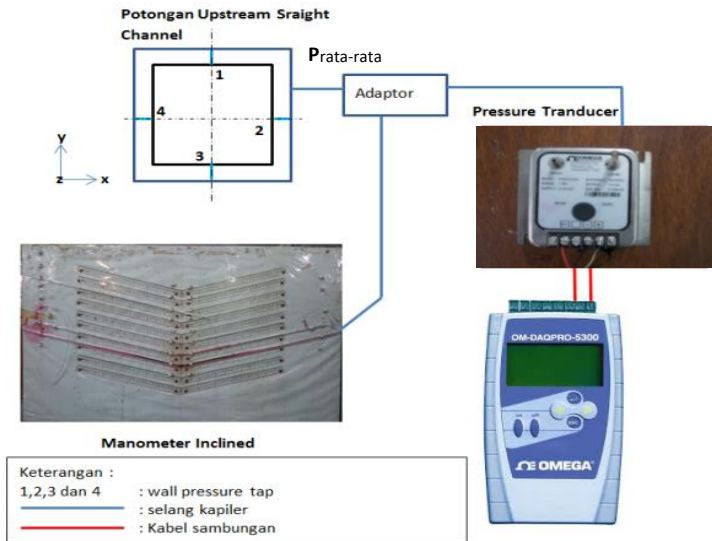
Gambar 3.9 Skema validasi tekanan dinamis *pressure transducer 1" WC*



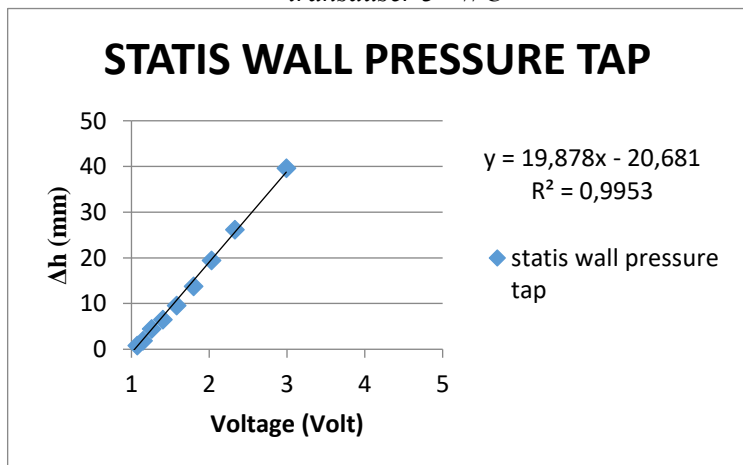
Gambar 3.10 Hasil validasi tekanan dinamis
pressure transducer 1" WC

3.4.3 Validasi Tekanan Statis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *inlet disturbance body*.
2. *Wall pressure tap* pada *inlet upstream* dihubungkan pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer 3" WC* untuk tekanan statis dinding.
5. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aqisisi didapatkan *Voltage* (Volt).
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage* (Volt) sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



Gambar 3.11 Skema validasi tekanan dinamis *pressure transduser 3" WC*



Gambar 3.12 Hasil validasi tekanan statis *pressure transduser 3" WC*

3.5 Prosedur Pengambilan Data

3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif

Parameter yang diukur pada penelitian ini meliputi tekanan stagnasi dan tekanan statis. Sebelum melakukan pengambilan data maka perlu dilakukan pengukuran suhu ruangan terlebih dahulu. Masing-masing pengukuran memiliki prosedur pengambilan data yang berbeda dan akan dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Prosedur pengukuran tekanan dinamis
 Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:
 - a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Pitot tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
 - c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler.
 - d) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - e) *Voltage* dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi pada dicatat.
 - f) *Blower* dimatikan
 - g) Langkah d sampai f diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:
 - a) *Test section* dipersiapkan.
 - b) *Wall pressure tap* dihubungkan ke *pressure transducer* dengan selang kapiler.
 - c) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - d) Data *voltage* dari *pressure transducer* dicatat.
 - e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.

- f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi $16D_h$ dari *inlet downstream straight channel*.

3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

Pengolahan data dilakukan dengan membuat sebuah contoh perhitungan. Beberapa data awal yang diperlukan untuk melakukan proses perhitungan adalah:

- Diameter hidrolis (D_h) : 125 mm
- Panjang *downstream straight channel* : 2000 mm
- Panjang *inlet upstream* sampai *downstream* :
 - inner wall* (l_i) : 3170 mm
 - Outer wall* (l_o) : 3268 mm
- Sudut *inclined manometer* (θ) : 15°
- *Specific Gravity kerosene* ($SG_{kerosene}$) : 0,827
- Percepatan Gravitasi (g) : $9,81 \text{ m/s}^2$
- Temperatur ruangan dianggap konstan (T) : 28°C
- Massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{ud}) : $1,182 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas kinematis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ν) : $1,59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Massa jenis air pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{H_2O}) : $996,4 \text{ kg/m}^3$

1) Perhitungan untuk *Reynolds Number*

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.11 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada *Reynolds Number* $8,19 \times 10^4$.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.11)$$

dimana: ρ_{ud} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m^3)

ν : viskositas kinematis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (m^2/s)

μ : viskositas absolut udara pada $T =$

28°C

U_{ref} : kecepatan freestream pada *inlet upstream straight channel* (m/s)

D_h : diameter hidrolik ducting (m)

Re_{Dh} : *Reynolds number*

Fan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *centrifugal fan*. Dengan kalibrasi validasi tekanan dinamik pada saluran *upstream straight channel* melalui *inclined manometer* untuk pengukuran nilai Δh . Nilai Δh diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz. Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.12 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 = SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y \sin 15^\circ$$

$$U_{ref}^2 = \frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}$$

$$U_{ref} = \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \quad (3.13)$$

dimana $P_{dinamis}$: ($P_{stagnasi} - P_{statis}$) tekanan dinamis diukur dengan *pitot tube* (N/m²)

$P_{kerosene}$: massa jenis *kerosene* pada 28°C (kg/m³)

ρ_{udara} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m³)

g : percepatan gravitasi (m/s²)

Δh : perbedaan fluida pada manometer (m)

U_{ref} : kecepatan freestream pada *inlet upstream* (m/s)

$SG_{kerosene}$: *Specific Gravity kerosene* pada 28°C

ρ_{H2O} : massa jenis air pada 28°C (kg/m³)

2) Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada 15 test section sepanjang *downstream straight channel* dengan variasi jarak peletakkan *inlet disturbance body*. Perhitungan profil kecepatan pada setiap *section* sepanjang *downstream straight channel* ditulis sesuai persamaan 3.14 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}} \quad (3.14)$$

dimana:

- p_o : tekanan stagnasi yang diukur dengan *stagnation pressure tube*
- p_s : tekanan statis sejajar dengan *stagnation pressure tube*
- ρ_{udara} : massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$
- $p_o - p_s$: tekanan dinamis

3) Perhitungan Koefisien Losses elbow 90° ($K_{elbow\ 90^\circ}$)

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *inlet disturbance body* pada jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0,2 D_h$, dan variasi diameter $d = 0,064 D_h$, $0,08 D_h$, $0,1 D_h$. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan koefisien losses elbow 90° pada saluran. Koefisien losses elbow 90° adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Pada eksperimen ini, koefisien losses elbow 90° didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* .

$$P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ} = K_{elbow\ 90^\circ} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.15)$$

$$K_{elbow\ 90^\circ} = \frac{(P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.16)$$

dimana	$P_{outlet\ elbow\ 90^\circ}$:	Tekanan pada <i>outlet elbow 90°</i> (N/m ²)
:	$P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}$:	Tekanan pada <i>inlet elbow 90°</i> (N/m ²)
	\bar{V}^2	:	Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)
	ρ_{udara}	:	massa jenis udara pada 28°C (kg/m ³)
	$K_{elbow\ 90^\circ}$:	koefisien losses elbow 90°

Koefisien losses elbow 90° pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi Reynolds number $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 1.39 \times 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0.2 D_h$, dan variasi diameter $d = 0.064 D_h$, $0.08 D_h$, $0.1 D_h$.

4) Perhitungan Pressure Drop (Δp)

Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream straight channel* dan tekanan *outlet* pada *downstream straight channel*. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan P_{inlet} dan P_{outlet} adalah sebagai berikut :

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (3.17)$$

$$\Delta P = (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet})$$

$$\Delta P = (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet}) \quad (3.18)$$

dimana ΔP : *Pressure Drop* (N/m²)
 P_{inlet} : Tekanan *inlet* pada *upstream*
straight channel (N/m²)
 P_{outlet} : Tekanan *outlet* pada *downstream*
(section 14) (N/m²)

5) Perhitungan *Pressure Coefficient* (C_p)

Pada eksperimen ini, perhitungan *pressure coefficient* dilakukan pada *elbow 90°* untuk mengetahui *pressure drop* pada *elbow 90°*, perhitungan C_p dilakukan pada sisi *inner* dan *outer* pada *elbow 90°* tersebut.

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2} \quad (3.19)$$

$$C_p = \frac{P_l - P_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2} \quad (3.20)$$

dimana C_p : *Pressure Coefficient*
 :
 P_l : Tekanan lokal (N/m²)
 P_{∞} : Tekanan *freestream* (N/m²)
 ρ : Massa jenis udara (kg/m³)
 V_{∞} : Kecepatan udara *freestream*
 (m/s)

3.6 Urutan Langkah Penelitian

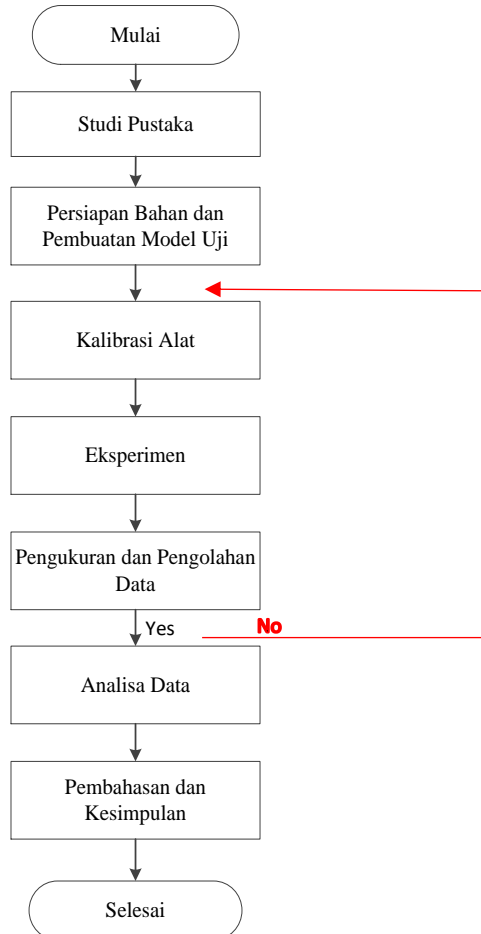
Pada tabel 3.1 dijelaskan urutan langkah penelitian yang akan dilakukan. Urutan langkah penelitian adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Urutan langkah penelitian

No.	Profil Kecepatan	Pressure Drop
1.	Peralatan disiapkan sesuai dengan instalasi penelitian	Peralatan disiapkan sesuai dengan instalasi penelitian
2.	<i>Inlet Disturbance Body</i> dipasang pada jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0.2 D_h$, dan diameter $d = 0.064 D_h$ sebelum <i>inlet elbow</i> 90°	<i>Inlet Disturbance Body</i> dipasang pada jarak $l = 0,1 D_h$, $g = 0.2 D_h$, dan diameter $d = 0.064 D_h$ sebelum <i>inlet elbow</i> 90°
3.	<i>Induced Draft Fan</i> dinyalakan	<i>Induced Draft Fan</i> dinyalakan
4.	Kecepatan pada <i>inlet</i> 10 m/s dengan <i>Reynolds Number</i> (Re_{Dh}) $8,19 \times 10^4$	Kecepatan <i>inlet</i> 5 m/s sampai 17 m/s yang memiliki variasi <i>Reynolds Number</i> (Re_{Dh}) $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} > 1,39 \times 10^5$
5.	Profil kecepatan dihitung dari tekanan dinamis dengan <i>pitot tube</i> pada 15 <i>sections</i> sepanjang <i>downstream</i> dengan setiap <i>section</i> terdapat 17 titik pengambilan data	<i>Pressure Drop</i> dihitung dari pengukuran tekanan statis <i>wall pressure tap</i> pada posisi P_{inlet} dan P_{outlet} .
6.	Data diolah hingga didapatkan grafik profil kecepatan pada setiap <i>section</i>	Data diolah hingga didapatkan grafik <i>pressure drop vs Re_{Dh}</i>
7.	Langkah 2 sampai 6 diulangi dengan variasi diameter <i>Inlet Circular Disturbance Body</i> $d = 0.08 D_h$, dan $0.1 D_h$	Langkah 2 sampai 6 diulangi dengan variasi diameter <i>Inlet Circular Disturbance Body</i> $d = 0.08 D_h$, dan $0.1 D_h$

3.7 Flowchart Penelitian





Gambar 3.13 merupakan *flowchart* dari urutan langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan.






Gambar 3.13 *Flowchart* penelitian

3.8 Gambar Peralatan Penelitian

Tabel 3.2 Peralatan penelitian

No	Nama Alat	Gambar
1	DAQ PRO 5300 0-24 mA; 0-10V max Input : 8 Rate : 100/sample Samples : 1000	
2	Differential Pressure Transmitter Model : PX653-01D5V Model : PX653-03D5V Range : 1" WC Range : 3" WC Supply : 12-36 V Supply : 12-36 V Accuracy : per/spec Accuracy : per/spec	
3	Inverter Model : ATV31HU15M2A U (V~) : input = 200/240 Ø1 output = 200/240 Ø3 F (Hz) : input = 50/60 output = 0.5/500 I (A) : input = 15.8 max output = 8.0	
4	Centrifugal Fan Fan : type : VDC/4 – 225 0.75 kW; 1400 RPM 220 V; 50 Hz Motor : type : 71M4 – 4 B3 220/380 V; 50 Hz; 0.75 kW	

5	Pitot Static Tube	
6	Inclined Manometer Cairan : kerosin SG = 0.827 Sudut (α) = 15°	
7	Inlet Disturbance Body Dimensi : $l = 125$ mm $\phi_1 = 8$ mm $\phi_2 = 10$ mm $\phi_3 = 12.5$ mm	

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

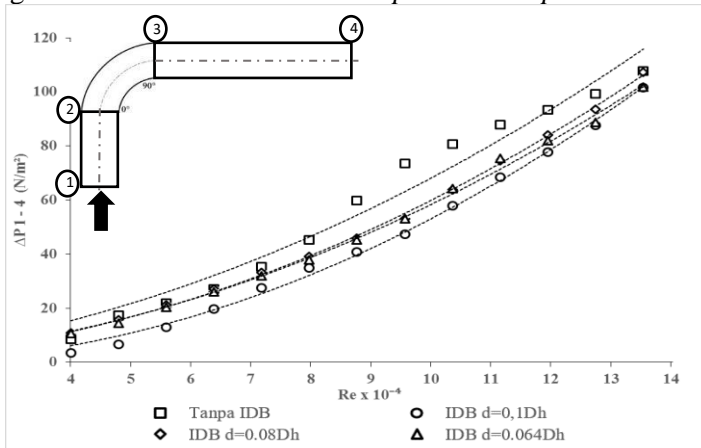
Pada bab berikut akan ditampilkan dan dibahas hasil studi eksperimen yang sudah didapatkan dari data eksperimen. Penyajian hasil studi eksperimen ditampilkan dalam sub-bab sebagai berikut, yaitu *pressure drop* pada *square duct*, *coefficient loss minor* pada *elbow 90°*, *coefficient pressure* pada *elbow 90°*, dan profil kecepatan pada posisi vertikal dan horizontal.

4.1 Pressure Drop pada Square Duct dengan dan tanpa Inlet Disturbance Body pada Elbow 90° Fungsi Reynolds Number

Pada sub-bab ini menunjukkan hasil eksperimen dalam grafik bilangan *Reynolds* (Re_{Dh}) terhadap *pressure drop* (Δp) dengan pengaruh *inlet disturbance body* (IDB) pada saluran *square duct*. Eksperimen dilakukan dengan variasi diameter IDB $d = 0.064D_h$, $d = 0.08 D_h$, $d = 0.1 D_h$, dan tanpa IDB pada posisi jarak $0.1 D_h$, dan *gap* $0.2 D_h$ yang konstan. Variasi berikutnya adalah bilangan *Reynolds* (Re_{Dh}) mulai dari 3.97×10^4 sampai 1.35×10^5 . *Pressure drop* diukur pada *inlet upstream duct* dan *outlet downstream duct* pada setiap variasi diameter, dan hasilnya ditunjukkan pada gambar 4.1.

Pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa nilai *pressure drop* meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya *Reynolds Number* pada setiap variasi diameter *inlet disturbance body*. Dimana *trendline* grafik meningkat mulai dari nilai Re 3.97×10^4 sampai dengan nilai Re 13.5×10^4 disemua variasi diameter. Namun jika dicermati terdapat fenomena lain yaitu dapat dilihat bahwa dengan ditamhakkannya *inlet disturbance body* pada sisi *inlet elbow* dapat menghasilkan *pressure drop* yang lebih rendah dibandingkan tanpa ditambahkan *inlet disturbance body*. Berdasarkan gambar 4.1, variasi diameter $0.1 D_h$ dapat menurunkan nilai *pressure drop* secara rata-rata

mencapai 30%, kemudian untuk variasi $0.08 D_h$ dapat menurunkan nilai *pressure drop* secara rata-rata 8%. Sedangkan variasi $0.064 D_h$ dapat menurunkan nilai *pressure drop* secara rata-rata 11%. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi diameter $0.1 D_h$ memiliki pengaruh yang paling besar dalam menurunkan nilai *pressure drop*.



Gambar 4.1 *Pressure drop* pada *square duct* dengan variasi Reynolds Number $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ dan variasi diameter inlet disturbance body $0.064 D_h$, $0.08 D_h$, $0.1 D_h$.

Berdasarkan persamaan energi 4.1, 4.2, dan 4.3 dapat dikatakan bahwa semakin besarnya nilai Re maka semakin besar pula nilai *pressure drop*-nya. Selain itu, pada persamaan 4.3 dapat dilihat pula secara teori bahwa seharusnya dengan adanya penambahan suatu benda yaitu *inlet disturbance body* menambah nilai *head loss minor* yang kontribusi oleh nilai *loss coefficient inlet disturbance body*. Hal ini dapat mengakibatkan nilai *pressure drop* pada saluran meningkat dari pada tanpa *inlet disturbance body*, karena nilai *coefficient inlet disturbance body* berbanding lurus dengan besarnya *pressure drop*. Ditambah lagi jika nilai *coefficient inlet disturbance body* dikalikan dengan besarnya kecepatan maka nilai *pressure drop* nya akan

semakin tinggi ketika nilai kecepatannya dinaikkan. Pembuktian tersebut dapat dilihat dari persamaan dibawah ini :

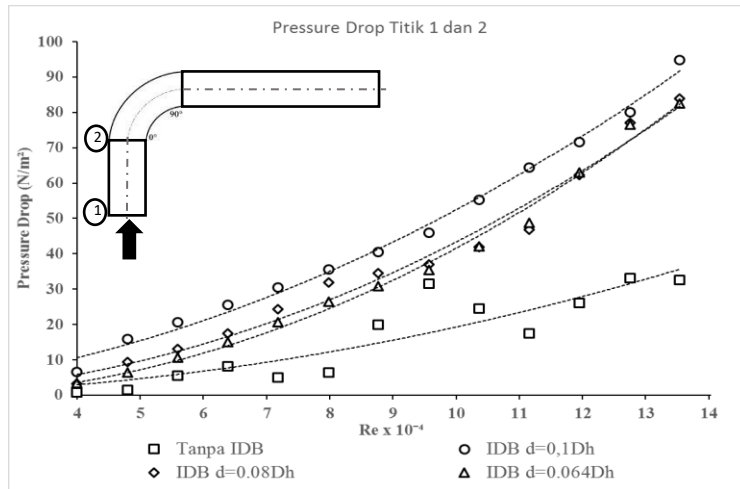
$$\frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{V}_{outlet}^2}{2} + gz_{outlet} = \frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{V}_{inlet}^2}{2} + gz_{inlet} + h_{lT} \quad (4.1)$$

dengan * $\bar{V}_{outlet}^2 = \bar{V}_{inlet}^2$ dan $gz_{outlet} = gz_{inlet}$, maka :

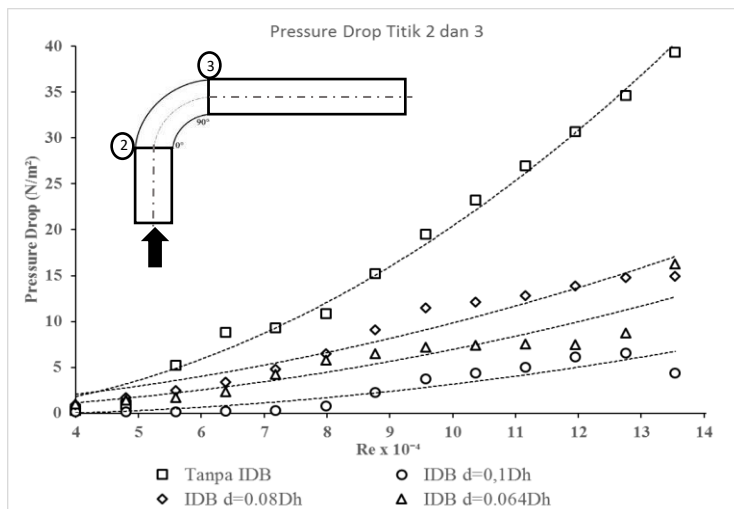
$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{lT} \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\bar{V}^2}{2} x \left(f \frac{L_{upstream}}{D_h} + f \frac{L_{downstream}}{D_h} + k_{elbow 90^\circ} \right) \quad (4.3)$$

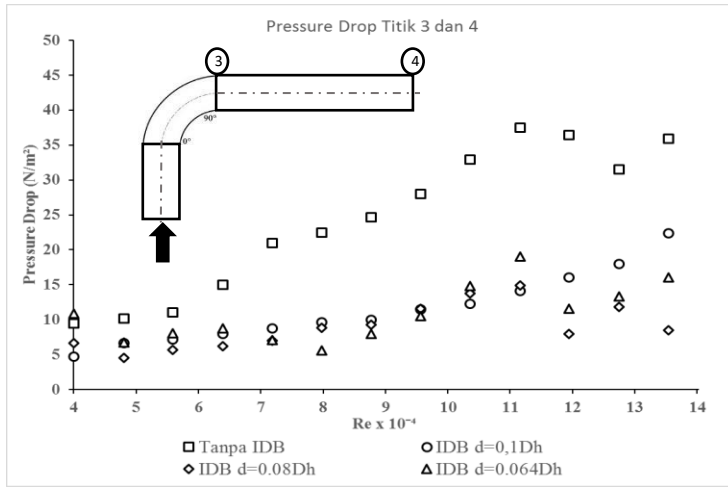
Pada gambar 4.2 ditunjukkan penurunan nilai *pressure drop* dimana untuk gambar 4.2a menjelaskan penurunan *pressure drop* pada titik 1 sampai 2 (*upstream*), gambar 4.2b penurunan *pressure drop* titik 2 sampai 3 (*elbow*), dan gambar 4.2c penurunan *pressure drop* titik 3 sampai 4 (*downstream duct*). Pada titik 1-2 nilai *pressure drop* yang paling tinggi adalah variasi diameter $0.1 D_h$ dengan nilai , sedangkan untuk yang paling rendah adalah variasi tanpa IDB. Pada posisi ini terlihat jelas bahwa seluruh variasi diameter IDB memiliki nilai *pressure drop* yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi tanpa penambahan IDB. Sedangkan pada titik 2-3 dan titik 3-4 memiliki hasil yang berbeda, yaitu seluruh variasi diameter IDB memiliki nilai *pressure drop* yang lebih rendah dibandingkan dengan variasi tanpa IDB. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh ditamlehkannya IDB hanya muncul setelah aliran melewati posisi peletakan IDB, sedangkan untuk posisi didepannya mendapatkan pengaruh yang kurang baik dengan ditunjukkannya nilai *pressure drop* yang lebih tinggi.



(a)



(b)



(c)

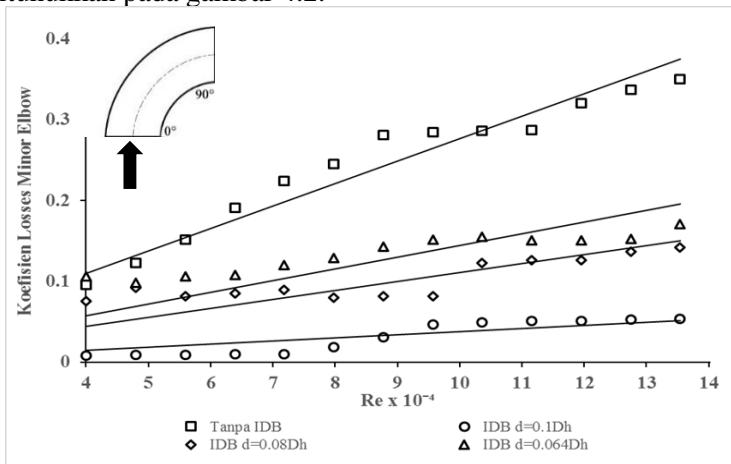
Gambar 4.2 Perbandingan *pressure drop* pada a). Titik 1-2 b). Titik 2-3 c). Titik 3-4 dengan variasi *Reynolds Number* $3.97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13.5 \times 10^4$ dan variasi diameter *inlet disturbance body* 0.064Dh, 0.08Dh, 0.1Dh.

Penurunan *pressure drop* dikarenakan dengan penambahan *inlet disturbance body* dapat melawan *adverse pressure* yang diakibatkan dengan adanya penambahan *elbow 90°* pada saluran. *Inlet disturbance body* akan mengurangi *losses* pada *elbow 90°* dengan memanfaatkan *shear layer* (aliran yang terseparasi) yang terjadi setelah aliran melewati *inlet disturbance body*, sehingga terjadi kenaikan intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner* dan mengurangi *blockage area* pada sisi *outlet elbow 90°*. Kondisi tersebut menjadikan momentum aliran masih cukup besar atau berkurang tidak cukup besar dibandingkan tanpa adanya *inlet disturbance body*. Sesuai dengan pembahasan paragraf pertama diatas bahwa penambahan *inlet disturbance body* secara signifikan berguna untuk menurunkan nilai *pressure drop*, tetapi hanya pada variasi

0.1 D_h yang memiliki pengaruh yang besar dan hanya berpengaruh pada posisi setelah diletakkannya *inlet disturbance body*.

4.2 Loss Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan dan tanpa Inlet Disturbance Body pada Elbow 90° Fungsi Reynolds Number

Pada sub-bab ini menunjukkan hasil eksperimen dalam grafik bilangan *Reynolds* (Re_{Dh}) terhadap *loss coefficient elbow* 90° dengan pengaruh *inlet disturbance body* (IDB) pada saluran *square duct*. Eksperimen dilakukan dengan variasi diameter IDB $d = 0.064 D_h$, $d = 0.08 D_h$, $d = 0.1 D_h$, dan tanpa IDB pada posisi jarak 0.1 D_h , dan gap 0.2 D_h yang konstan. Variasi berikutnya adalah bilangan *Reynolds* (Re_{Dh}) mulai dari 3.97×10^4 sampai 1.35×10^5 . *Loss coefficient elbow* 90° diukur pada *inlet elbow* 90° dan *outlet elbow* 90° duct pada setiap variasi diameter, dan hasilnya ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.3 *Loss Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan dan tanpa Inlet Disturbance Body pada Elbow 90° Fungsi Reynolds Number.*

Pada grafik gambar 4.3 menunjukkan bahwa nilai *loss coefficient elbow* 90° meningkat secara signifikan seiring dengan

bertambahnya *Reynolds Number* pada setiap variasi diameter *inlet disturbance body*. Dimana *trendline* grafik meningkat mulai dari nilai $Re\ 3.97 \times 10^4$ sampai dengan nilai $Re\ 13.5 \times 10^4$ disemua variasi diameter. Berdasarkan gambar 4.3, variasi yang memberikan penurunan nilai *loss coefficient elbow* 90° adalah variasi diameter (d) sebesar $0.1 D_h$ dengan nilai tertingginya adalah 0.05. Sedangkan nilai tertinggi *loss coefficient elbow* 90° untuk variasi diameter $0.08 D_h$ dan $0.064 D_h$ adalah 0.14 dan 0.17. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai *loss coefficient elbow* 90° untuk semua variasi diameter IDB lebih rendah daripada tanpa IDB, dimana nilai tertinggi *loss coefficient elbow* 90° tanpa IDB adalah 0.35.

Berdasarkan persamaan energi 4.4 – 4.7 dapat dikatakan bahwa semakin besarnya nilai Re maka semakin besar pula nilai *pressure drop*-nya. Pada persamaan 4.7 dapat dilihat pula secara teori bahwa dengan meningkatnya nilai *pressure drop* maka akan meningkatkan nilai *loss coefficient elbow* 90° begitu pula sebaliknya. Selain itu dengan adanya penambahan suatu *inlet disturbance body* akan menambah nilai *head loss minor* yang dikontribusi oleh nilai *coefficient inlet disturbance body*. Hal ini dapat mengakibatkan nilai *pressure drop* pada saluran meningkat dari pada tanpa *inlet disturbance body*, karena nilai *coefficient inlet disturbance body* berbanding lurus dengan besarnya *pressure drop*. Ditambah lagi jika nilai *coefficient inlet disturbance body* dikalikan dengan besarnya kecepatan maka nilai *pressure drop* nya akan semakin tinggi ketika nilai kecepataannya dinaikkan. Pembuktian tersebut dapat dilihat dari persamaan dibawah ini :

$$\frac{P_{outlet}}{\rho} + \frac{\bar{V}_{outlet}^2}{2} + g z_{outlet} = \frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{V}_{inlet}^2}{2} + g z_{inlet} + h_{lm} \quad (4.4)$$

dengan * $\bar{V}_{outlet}^2 = \bar{V}_{inlet}^2$ dan $g z_{outlet} = g z_{inlet}$, maka :

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{elbow\ 90^\circ} \quad (4.5)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = k_{elbow\ 90^\circ} \left(\frac{\bar{V}^2}{2} \right) \quad (4.6)$$

$$k_{elbow\ 90^\circ} = \frac{2\Delta P}{\rho \cdot \bar{V}^2} \quad (4.7)$$

Penurunan nilai *loss coefficient elbow* 90° dikarenakan dengan penambahan *inlet disturbance body* dapat melawan *adverse pressure* yang diakibatkan dengan adanya penambahan *elbow* 90°. *Inlet disturbance body* akan mengurangi *losses* pada *elbow* 90° dengan memanfaatkan *shear layer* (aliran yang terseparasi), sehingga terjadi kenaikan intensitas tubulensi yang cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner* dan mengurangi *blockage area*. Kondisi tersebut menjadikan momentum aliran masih cukup besar atau berkurang tidak cukup besar dibandingkan tanpa adanya *inlet disturbance body*. Berdasarkan pembahasan diatas dapat diketahui bahwa besarnya *loss coefficient elbow* 90° sangat bergantung pada besarnya nilai *pressure drop* pada *elbow* 90°. Jika *pressure drop* pada *elbow* 90° dapat diturunkan maka besarnya *loss coefficient elbow* 90° juga akan berkurang.

4.3 Perbandingan Pressure Coefficient Elbow 90° pada Square Duct dengan dan tanpa Inlet Disturbance Body pada Nilai Reynolds Number 8.74×10^4

Pada sub-bab ini menunjukkan hasil eksperimen dalam grafik yang berupa sudut kelengkungan *elbow* yang diplot disetiap kenaikan 5° terhadap *pressure coefficient elbow* 90° dengan pengaruh *inlet disturbance body* (IDB). Eksperimen dilakukan dengan variasi diameter IDB $d = 0.064 D_h$, $d = 0.08 D_h$, $d = 0.1 D_h$, dan tanpa IDB pada posisi jarak $0.1 D_h$, dan *gap* $0.2 D_h$ yang konstan. *Pressure coefficient elbow* 90° diukur pada *pressure tap inner elbow* 90° dan *pressure tap outer elbow* 90° dengan kenaikan posisi *pressure tap* 5° setiap variasi diameter. Hasil pengukuran *pressure coefficient elbow* 90° dapat dilihat pada gambar 4.4, dimana pada gambar tersebut memuat perubahan *pressure coefficient* (C_p) disepanjang sisi *outer wall* dan *inner wall elbow* 90°. Pada gambar 4.4 terdapat dua kurva yaitu kurva bagian atas dan kurva bagian bawah, masing-masing menunjukkan karakteristik aliran yang berbeda.

Kurva bagian atas merupakan C_p pada sisi *outer wall*, sedangkan kurva bagian bawah merupakan C_p pada sisi *inner wall*. Pengamatan dilakukan pada nilai *Reynolds Number* yang sama yaitu 8.74×10^4 untuk mengamati perbandingan *pressure coefficient elbow* 90° pada setiap variasi.

Berdasarkan gambar 4.4 ditunjukkan bahwa ketika aliran melewati sebuah *elbow* maka aliran tersebut akan mengalami fenomena seperti ketika aliran melewati *diffuser* dan *nozzle*. Ketika aliran melewati sisi *inner* telah terjadi fenomena seperti pada *nozzle* pada sudut 0° sampai 40° , dimana pada sudut tersebut terjadi penurunan tekanan yang menandakan terjadinya kenaikan tekanan. Namun, setelah aliran melewati sudut 45° sampai 90° terjadi kenaikan tekanan diikuti dengan penurunan kecepatan seperti yang terjadi pada *diffuser*. Pada sisi *outer* dengan sudut 0° hingga 50° terjadi kenaikan tekanan, dengan kata lain pada sudut tersebut terjadi penurunan kecepatan. Sedangkan sudut 55° sampai 90° terjadi penurunan tekanan dimana pada kondisi tersebut juga terjadi kenaikan kecepatan. Kondisi tersebut terjadi di semua variasi, baik variasi dimaeter IDB maupun tanpa IDB. Sehingga pengamatan dilakukan dengan menggunakan perhitungan ΔC_p untuk mendapatkan pengaruh penambahan IDB. Perhitungan ΔC_p dapat dilihat pada persamaan 4.9 dan 4.10, dimana perhitungannya melibatkan nilai C_p sisi *inner* dan C_p sisi *outer*.

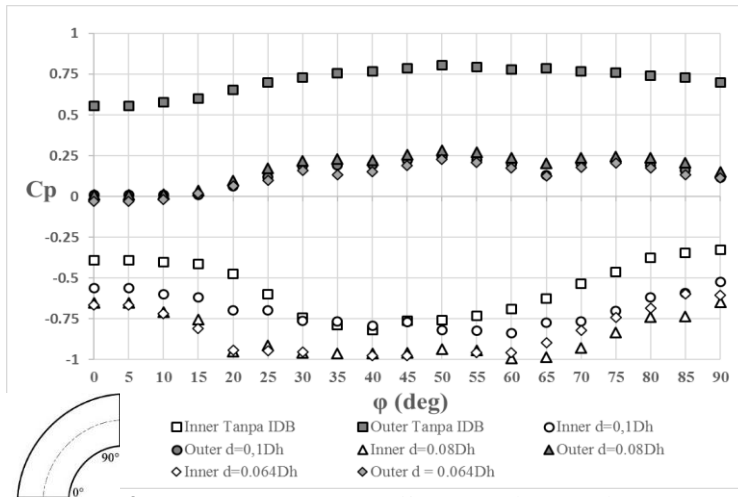
Kurva pada gambar 4.4 didapatkan dari perhitungan yang melibatkan besarnya tekanan pada setiap variasi yang dieksperimenkan. Perhitungan tersebut didapatkan dari persamaan sebagai berikut :

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (4.8)$$

Untuk melihat lebih detail seberapa besar ΔC_p maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta C_p = \Delta C_{p_{outlet}} - \Delta C_{p_{inlet}} \quad (4.9)$$

$$\Delta C_p = (C_{p_{outer}} - C_{p_{inner}})_{outlet} - (C_{p_{outer}} - C_{p_{inner}})_{inlet} \quad (4.10)$$



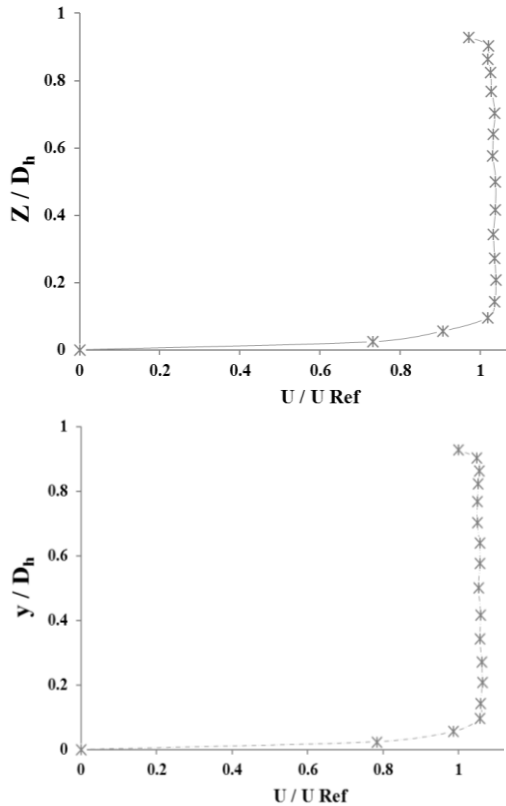
Gambar 4.4 Pressure coefficient elbow 90° dengan dan tanpa inlet disturbance body sebagai fungsi Reynolds number.

Berdasarkan persamaan diatas, dikatakan bahwa ketika nilai C_p tinggi maka terjadi kenaikan pada tekanan *countur* dan menandakan juga terjadi penurunan kecepatan yang diakibatkan oleh adanya *blockage area*. Kemudian jika diamati secara detail besarnya perbedaan nilai ΔC_p pada masing-masing variasi didapatkan nilai ΔC_p yang paling kecil adalah variasi diameter 0.1 D_h sebesar 0.072, sedangkan nilai yang paling besar terdapat pada variasi tanpa IDB yaitu sebesar 0.099. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa besarnya *pressure drop* tanpa IDB lebih besar dari pada dengan ditambahkan IDB, hal ini sesuai dengan pembahasan pada sub-bab 4.1. Selain itu terdapat fenomena lain yaitu bentuk distribusi pada bagian *outer wall* memiliki distribusi yang relatif sama sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan IDB sebagian besar berpengaruh pada bagian *inner wall* dimana perbedaan distribusi pada sisi *inner* menunjukkan pengaruh dari variasi diameter yang digunakan. Fenomena lain yang terjadi pada sisi *inner* adalah adanya *reatachment*, yaitu terjadinya tumbukan dari *shear layer* yang diakibatkan oleh penambahan IDB dimana

shear layer tersebut dapat meningkatkan momentum untuk melawan *advers pressure* (detailnya dibahas di sub-bab berikutnya).

4.4 Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi *Upstream Duct* dan Sisi *Downstream Duct* $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$

Pada sub-bab ini menunjukkan hasil eksperimen dalam grafik profil kecepatan pada bidang horizontal dan vertikal tanpa dan dengan pengaruh ditambahkan *inlet disturbance body* (IDB) pada saluran *square duct* pada posisi *upstream*. Eksperimen dilakukan dengan variasi diameter IDB $d = 0.064 D_h$, $d = 0.08 D_h$, $d = 0.1 D_h$, dan tanpa IDB pada posisi jarak $0.1 D_h$, dan *gap* $0.2 D_h$ yang konstan. Pengukuran dilakukan pada nilai *Reynolds Number* 8.74×10^4 atau dengan kecepatan 11 m/s. Pengukuran dilakukan dengan cara memasang *pitot static tube* pada posisi *upstream* dan menggesernya dari sisi *inner* sampai sisi *outer* saluran. Profil kecepatan pada sisi *upstream straight duct* digunakan sebagai data acuan untuk menentukan proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream straight duct* pada *section* yang telah ditentukan baik pada sisi horizontal maupun sisi vertikal. Gambar 4.5.(a) menunjukkan bentuk aliran pada sisi *upstream straight duct* dalam grafik profil kecepatan pada bidang horizontal, sedangkan gambar 4.5.(b) menunjukkan pola aliran pada bidang vertikal. Profil kecepatan merupakan bilangan tak berdimensi yang terdiri dari perbandingan z/D_h pada ordinat horizontal atau y/D_h ordinat



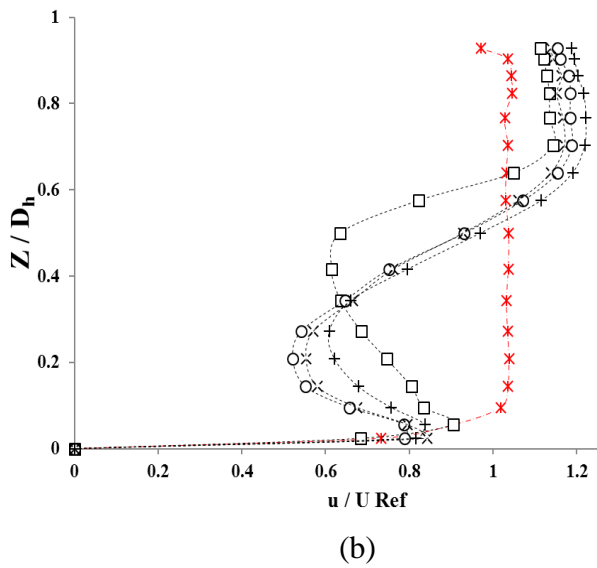
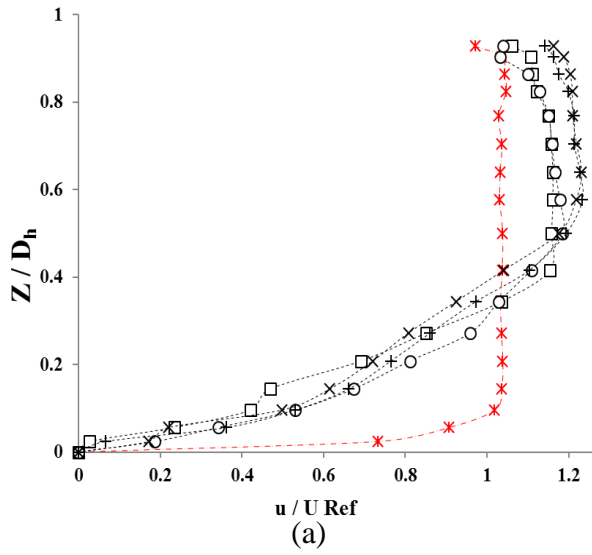
Gambar 4.5 Grafik *velocity profile* (a) bidang horizontal sisi *upstream straight duct*
(b) bidang vertikal sisi *upstream straight duct*

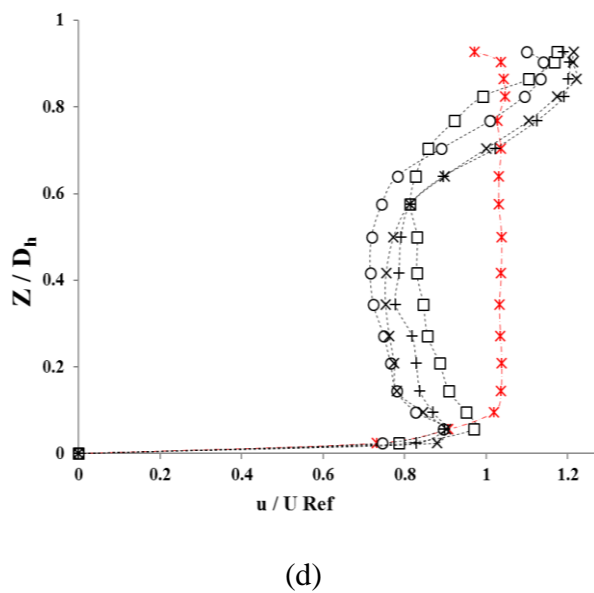
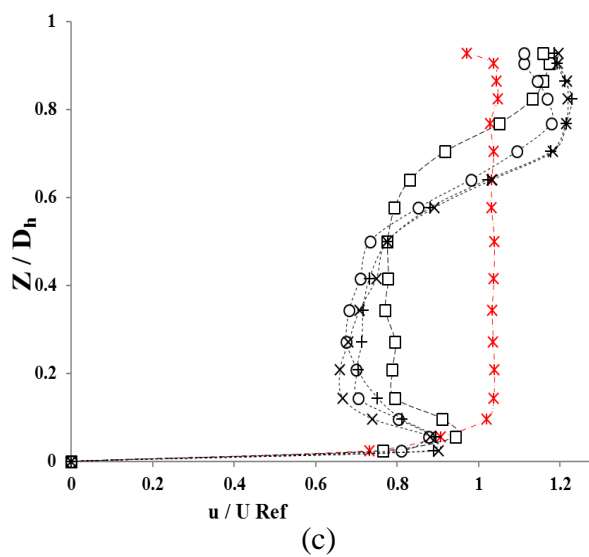
vertikal dan u/u_{ref} pada absis. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ dan $y/D_h = 0$ merupakan posisi yang searah dengan sisi *inner upstream straight duct*, sedangkan $z/D_h = 1$ dan $y/D_h = 1$ merupakan posisi yang searah dengan sisi *outer upstream straight duct*. Pengukuran profil kecepatan dilakukan pada nilai $Re = 8.74 \times 10^4$ baik pada bidang horizontal maupun vertikal.

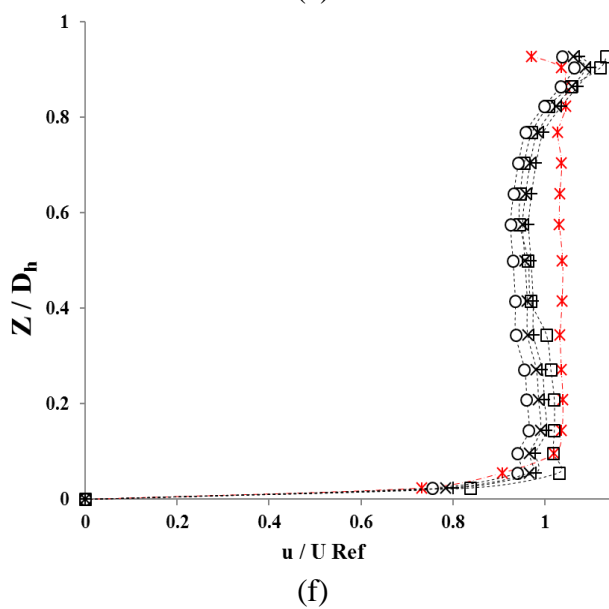
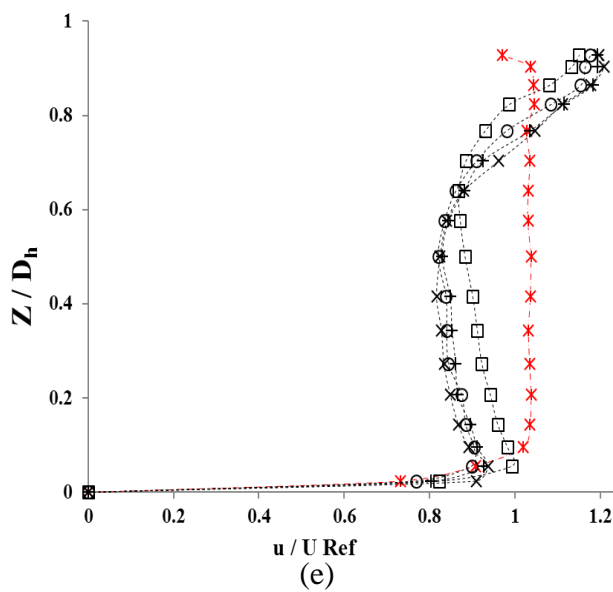
4.4.1 Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada Sisi *Downstream Duct* dengan $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$

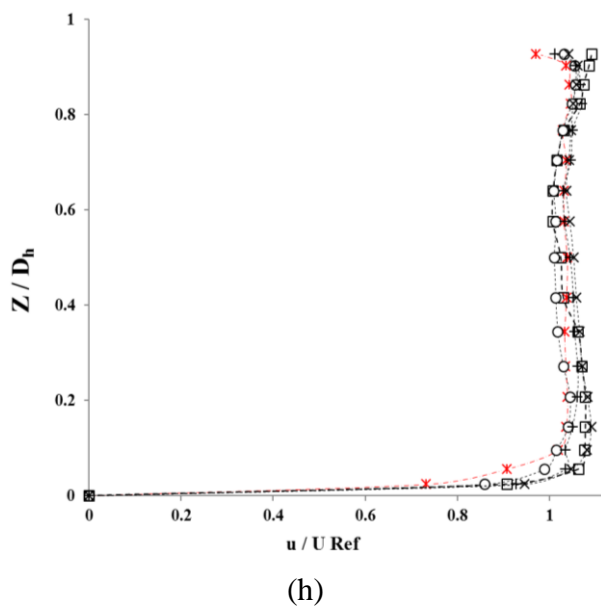
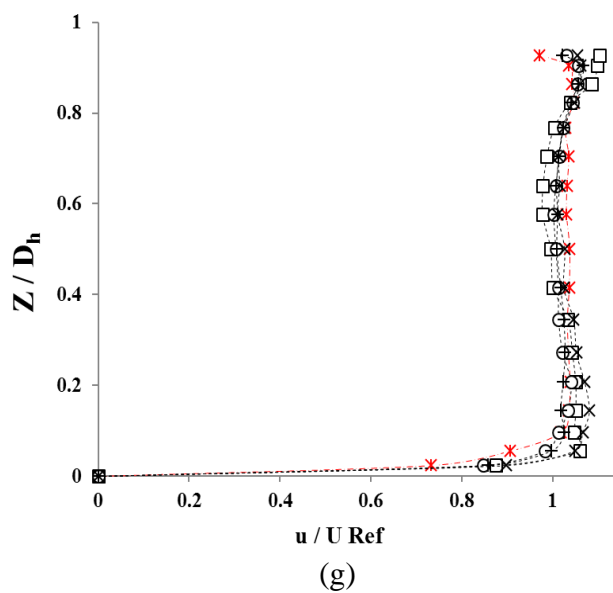
Profil kecepatan bidang horizontal pada sisi *downstream duct* diambil dari data *section 1* ($x/D_h=0$), $x/D_h=1$, $x/D_h=2$, $x/D_h=3$, $x/D_h=4$, $x/D_h=5$, $x/D_h=9$, $x/D_h=12$, dan $x/D_h=14$. Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari *inner wall* sampai *outer wall*. Variasi IDB yang digunakan, yaitu tanpa IDB, $0.1 D_h$, $0.08 D_h$ dan $0.064 D_h$. Pengambilan data dilakukan pada $Re_{Dh} 8.74 \times 10^4$. Pada setiap *section*, aliran *freestream* digunakan sebagai acuan aliran sudah melalui proses *recovery*.

Pada gambar 4.6 ditunjukkan gambar analisa tentang perilaku aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight duct* berupa grafik profil kecepatan pada bidang horizontal. Profil kecepatan adalah bilangan tak berdimensi yang bernilai nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan u/u_{ref} pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight duct* dan $z/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight duct*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa *inlet disturbance body* dengan variasi diameter $0.1 D_h$, $0.08 D_h$, dan $0.064 D_h$.









-*- Sisi Upstream -□- Tanpa IDB --○- IDB 0.1Dh
 --x- IDB 0.08Dh --+- IDB 0.064Dh

Gambar 4.6 Grafik profil kecepatan bidang horizontal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* : (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 12; (h) 14

Distribusi profil kecepatan mulai terlihat beragam ketika melewati *outlet elbow 90°*, dimana terjadi perbedaan signifikan antara kecepatan sisi *inner* dan *outer*. Saat aliran telah melewati *elbow 90°*, sisi *inner* mulai mengalami separasi aliran yang menyebabkan terjadinya pengurangan kecepatan. Perbedaan tekanan karena kelengkungan *radius elbow 90°* juga mempengaruhi kecepatan aliran. Pada sisi *outer* memiliki tekanan yang lebih besar sehingga menyebabkan aliran tangensial yang mengarah ke *inner wall*. Hal tersebut dapat menyebabkan *blockage effect* dan terlihat pada gambar 4.6 (a) aliran terbesar di daerah *centerline*. Kemudian perlambatan paling besar terjadi pada variasi tanpa IDB karena aliran lebih awal terseparasi. Penambahan IDB dapat menunda separasi aliran karena momentum aliran lebih kuat melawan *advers pressure* dan pengaruh terbesar ditunjukkan oleh variasi diameter 0.1Dh. Pada $x/Dh=1$ menunjukkan distribusi kecepatan aliran yang berubah signifikan.

Karena pengaruh *blockage effect*, sebagian aliran juga mengarah ke *outer wall* sehingga menambah kecepatan pada sisi *outer*. Aliran sekunder yang awalnya dominan terjadi pada sisi *inner* kemudian bergerak ke sisi *outer* menyebabkan pengaruh *backflow* semakin kuat. Hal tersebut berlanjut terjadi pada $x/Dh=2$, $x/Dh=3$, $x/Dh=4$, dan $x/Dh=5$ dimana pada sisi *inner* kecepatan terbesar pada variasi tanpa IDB. Setelah melewati $x/Dh=5$, profil kecepatan mengalami proses *recovery* dimana efek dari *backflow* dan *blockage* mulai hilang. Pada $x/Dh=8$, pada sisi *inner* kecepatan tertinggi masih terjadi pada variasi tanpa IDB. Pada $x/Dh=12$, dan $x/Dh=14$ aliran mulai *uniform* seperti yang ditunjukkan oleh profil kecepatan *freestream*. Tetapi efek dari *backflow* masih terlihat tipis

di area mendekati sisi *outer wall*. Pada sisi *inner* juga terlihat mempunyai kecepatan yang sedikit lebih cepat karena proses *recovery* aliran berawal dari sisi mendekati *inner wall*.

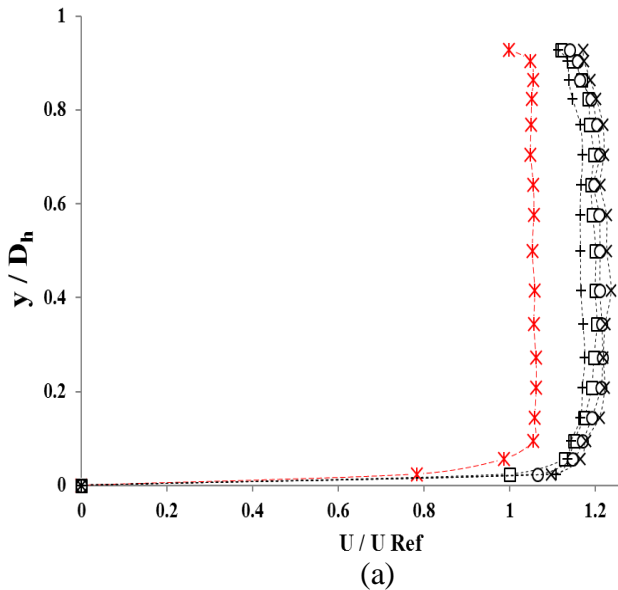
4.4.2 Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada Sisi *Downstream Duct* dengan $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$

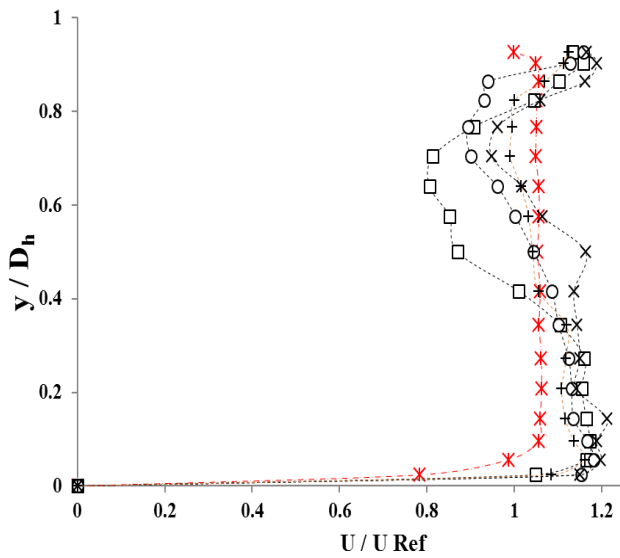
Profil kecepatan bidang vertikal pada sisi *downstream duct* diambil dari data *section 1* ($x/D_h=0$), $x/D_h=1$, $x/D_h=2$, $x/D_h=3$, $x/D_h=4$, $x/D_h=5$, $x/D_h=9$, $x/D_h=12$, dan $x/D_h=14$. Pengambilan data pada setiap *section* terdiri dari 17 titik dari *inner wall* sampai *outer wall*. Variasi IDB yang digunakan, yaitu tanpa IDB, 0.1 Dh, 0.08Dh dan 0.064Dh. Pengambilan data dilakukan pada $Re_{Dh} 8.74 \times 10^4$. Pada setiap *section*, aliran *freestream* digunakan sebagai acuan aliran sudah melalui proses *recovery*.

Pada sub bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi profil kecepatan pada bidang vertikal beserta kontur yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran *downstream straight duct* pada bidang vertikal. Pada gambar 4.7 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight duct* berupa grafik profil kecepatan pada bidang vertikal. Profil kecepatan dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{u}{u_{ref}}$ pada ordinat. Absis

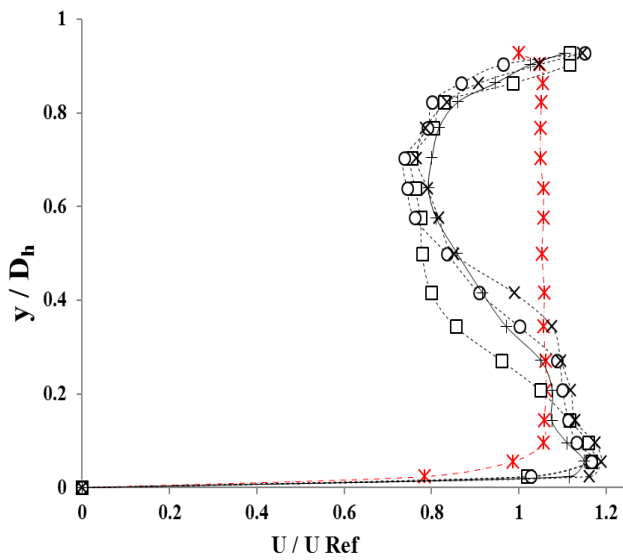
pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $y/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight duct* dan $y/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight duct*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa *inlet disturbance body* dengan variasi diameter 0.1Dh, 0.08Dh, dan 0.064Dh.

Distribusi kecepatan aliran mulai terlihat berubah ketika melewati *outlet elbow 90°* dimana pada sisi mendekati y/D_h satu mengalami percepatan aliran pada semua variasi gap. Pada $x/D_h=1$ terlihat perubahan distribusi kecepatan pada sisi *lower* maupun *upper wall*. Perlambatan aliran terjadi pada *upper wall* karena adanya pengaruh

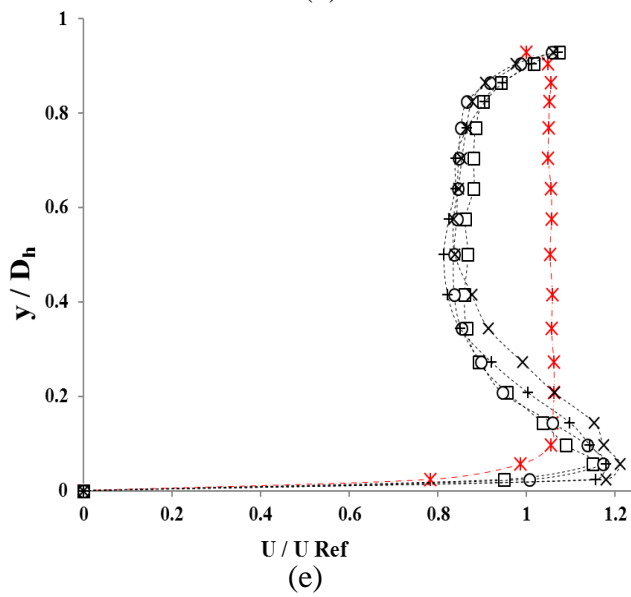
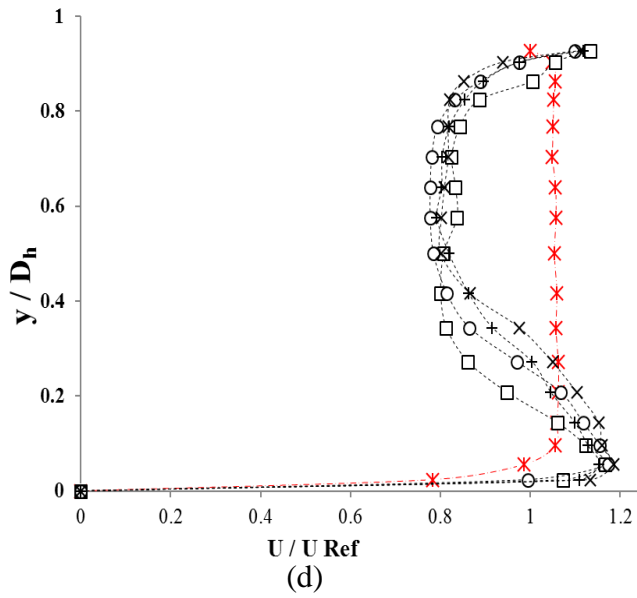


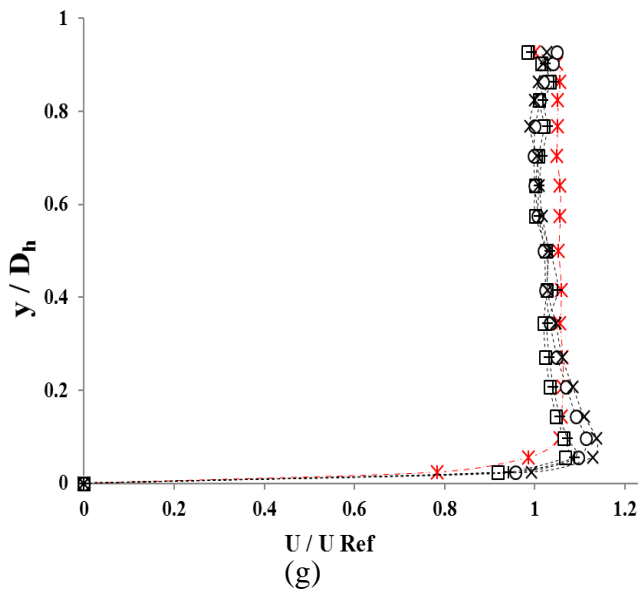
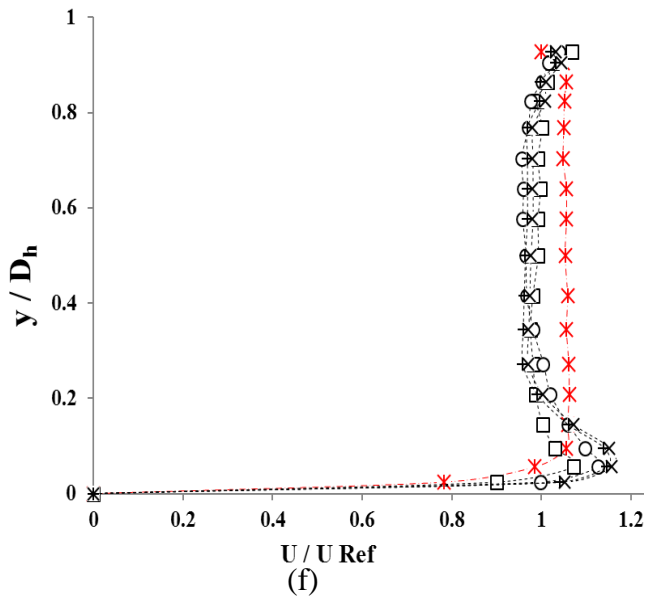


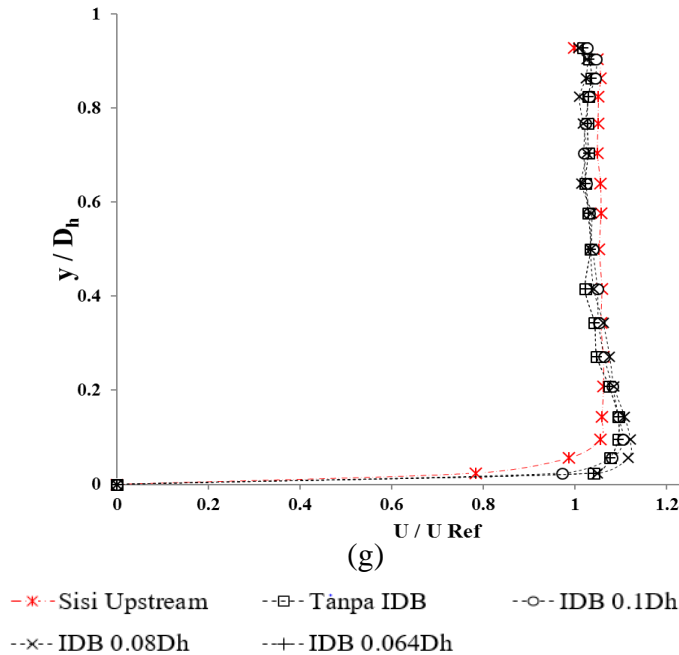
(b)



(c)





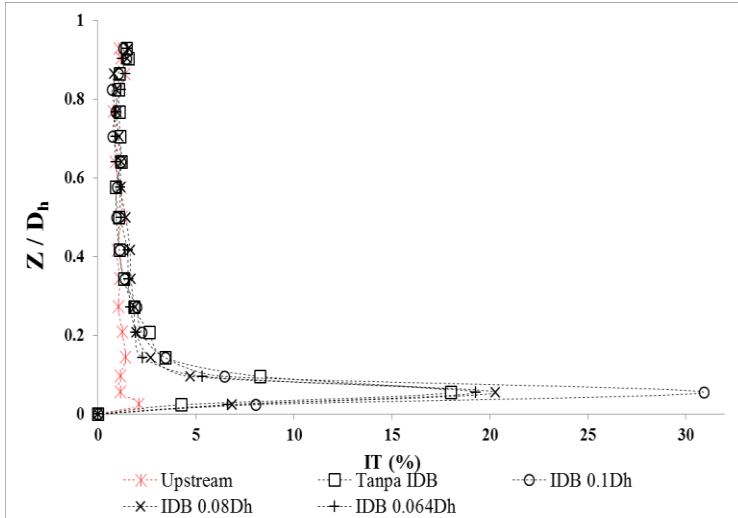


Gambar 4.7 Grafik profil kecepatan bidang vertikal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* : (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 12; (h) 14

4.5 Perbandingan Intensitas Turbulensi Bidang Horisontal untuk Variasi Tanpa IDB dan IDB 0.1 D_h , 0.08 D_h , 0.064 D_h pada $Re_{Dh} = 8,74 \times 10^4$

Sub-bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi intensitas turbulensi pada bidang horizontal yang diplot pada sebuah grafik yang membandingkan intensitas turbulensi pada semua variasi IDB dan tanpa IDB. Intensitas Turbulensi (IT) adalah bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis dan ditunjukkan dengan persentase perbandingan fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (u_{avg}) pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ adalah posisi

yang searah dengan sisi *inner downstream straight duct* dan $z/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight duct*. Pengambilan data intensitas turbulensi dilakukan pada bidang horizontal pada posisi $x/D_h = 1$.

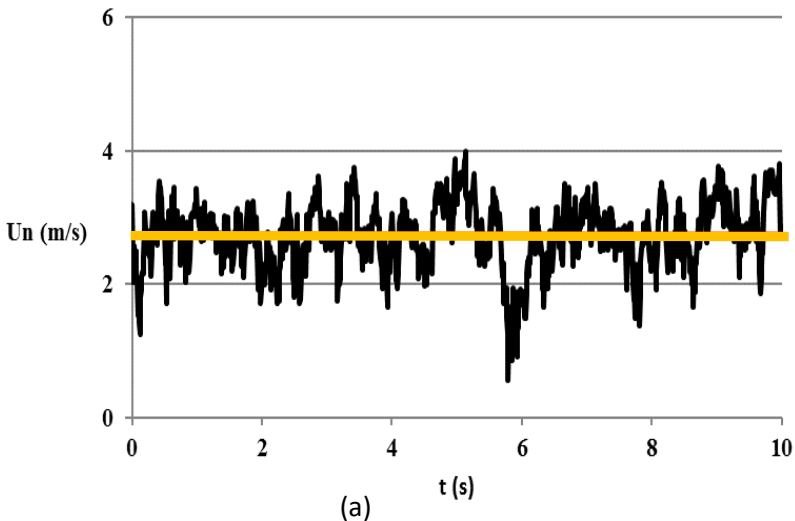


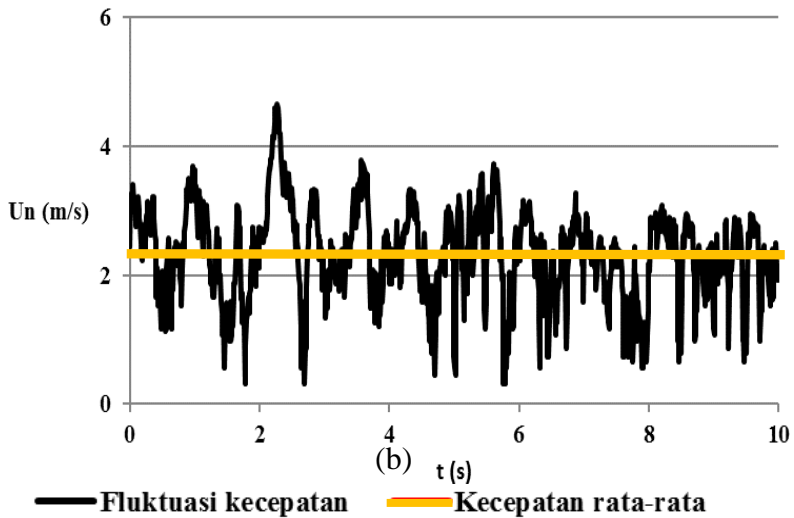
Gambar 4.8 Distribusi Intensitas Turbulensi (IT) pada bidang horizontal setelah *elbow* 90°

Pada gambar 4.8 dapat dilihat bahwa intensitas turbulensi (IT) pada sisi *outer* dan sisi *inner* sangatlah berbeda. Ketika distribusi dimulai pada sisi *outer* maka dapat dilihat distribusi IT terlihat datar dan sama disetiap variasi IDB dan tanpa IDB. Namun setelah distribusi IT tersebut mendekati sisi *inner* lebih tepatnya pada posisi $z/D_h = 0,056$ terjadi peningkatan IT secara signifikan. Peningkatan terjadi disemua variasi IDB dan tanpa IDB seperti pada gambar 4.8. Untuk variasi tanpa IDB prosentasi IT menunjukkan nilai yang paling kecil dibandingkan dengan variasi IDB. Pada variasi IDB ditunjukkan bahwa variasi diameter 0.064 D_h memiliki IT yang paling rendah dibandingkan dengan variasi

IDB $0.08 D_h$ dan $0.1 D_h$. Sedangkan nilai IT yang tertinggi ditunjukkan pada variasi diameter $0.1 D_h$.

Perhitungan IT pada gambar 4.8 menggunakan persamaan 4.11 dan didukung oleh persamaan 4.12. Untuk mendapatkan besarnya nilai IT digunakan cara pengambilan data secara berulang pada setiap titik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9 dan menggunakan persamaan 4.11 yaitu membandingkan antara akar rata-rata dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (u_{avg}). Secara teori intensitas turbulensi memiliki kriteria tertentu, jika IT bernilai 1% atau kurang dikategorikan rendah sedangkan IT bernilai 10% atau lebih dikategorikan tinggi. Semakin tingginya nilai fluktuasi kecepatan disuatu titik tertentu dan pada selang waktu tertentu, maka nilai turbulensi yang didapatkan akan semakin tinggi juga.





Gambar 4.9 Fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 1$ dan $z/D_h = 0,056$ pada (a) *elbow* ditambahkan IDB dengan diameter $01D_h$ dan (b) *elbow* tanpa ditambahkan IDB.

$$IT = \frac{u'}{u_{avg}} \times 100\% \quad (4.11)$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum(\bar{U} - U_n)^2}{n-1}} \quad (4.12)$$

Peningkatan nilai IT pada $z/D_h = 0,056$ menarik perhatian khusus karena pada posisi ini tampak jelas bahwa terjadi peningkatan IT secara signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada posisi $z/D_h = 0,056$ terjadi peningkatan fluktuasi atau fluktuasi di daerah tersebut sangat tinggi dibandingkan dengan posisi lain. Pada variasi tanpa IDB didapatkan nilai IT sebesar 18.02%. Nilai tersebut ternyata lebih kecil dibandingkan dengan besarnya nilai IT pada variasi penambahan IDB. Dimana variasi IDB dengan

diameter $0.1 D_h$, $0.08 D_h$, dan $0.064D_h$ menghasilkan nilai IT sebesar 30.92%, 20.27%, dan 19.23 secara berurutan. Dari hasil tersebut maka penambahan IDB dapat meningkatkan IT pada daerah setelah *elbow* 90° tetapi yang paling efektif adalah pada variasi diameter $0.1 D_h$. Hal ini memperkuat hipotesa awal penelitian ini bahwa dengan menambahkan IDB sebelum *elbow* 90° dapat meningkatkan intensitas turbulensi. Dimana turbulensi tersebut dapat memperkuat momentum aliran sehingga dapat melawan *adverse pressure* pada sisi *inner* setelah *elbow* 90° .

4.6 Sub-bab Diskusi

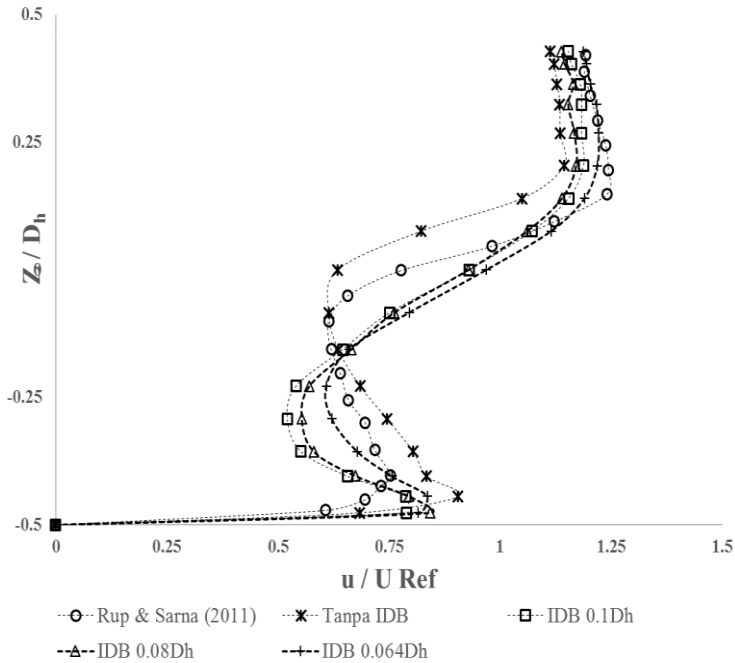
Pada sub-bab ini akan dibahas hal-hal detail yang perlu didiskusikan untuk memperkuat kesesuaian hasil eksperimen dengan hipotesa penelitian. Selain hal-hal detail, pada sub-bab ini akan dibandingkan juga antar hasil eksperimen dengan penelitian yang sudah dilakukan oleh peneliti lain untuk memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan.

4.6.1 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

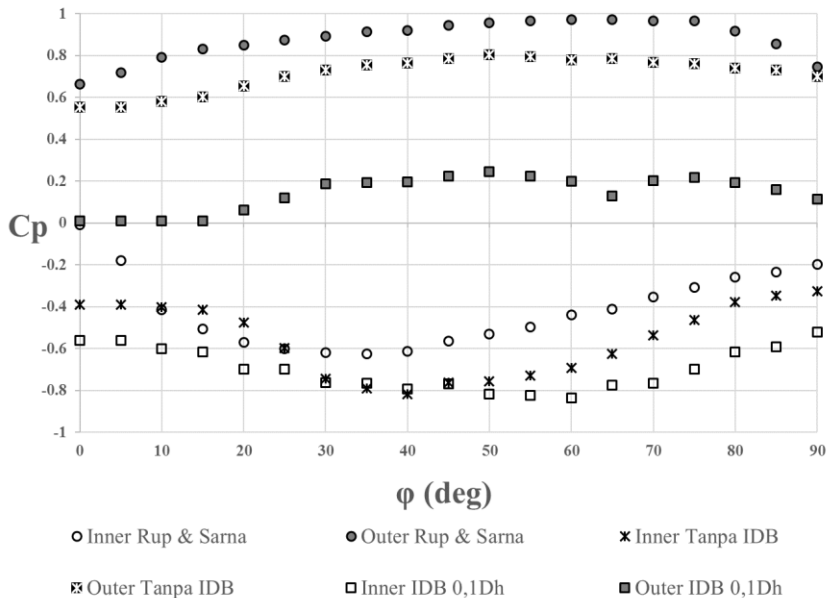
Pada sub-bab ini akan dibandingkan hasil eksperimen dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Rup & Sarna (2011). Rup & Sarna telah melakukan penelitian dengan topik dan tujuan yang sama untuk mengamati karakteristik aliran yang melewati *square duct* dengan ditambahkan *elbow* 90° . Namun ada beberapa perbedaan seperti pada *Reynolds Number* yang digunakan, dimensi saluran, rasio kelengkungan *elbow* 90° , panjang *upstream* dan *downstream*. Perbedaan tersebut dapat dikesampingkan karena hasil eksperimen yang dibandingkan menggunakan bilangan yang tak berdimensi sehingga perbedaan tersebut dapat dikesampingkan. Ada dua poin yang akan dibandingkan yaitu profil kecepatan dan *coefficient pressure*. Perbandingan ini bertujuan untuk mendapatkan validasi hasil eksperimen yang telah dilakukan sehingga hasil yang didapatkan dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya.

Perbedaan dimensi yang dijelaskan diatas dapat ditulis secara detail yaitu penelitian Rup & Sarna menggunakan *square duct* dengan diameter hidrolis (D_h) sebesar 80 mm, rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 2, dan panjang *upstream* sepanjang $20D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $20D_h$, sedangkan pada penelitian kali ini digunakan diameter hidrolis (D_h) sebesar 125 mm, rasio kelengkungan *elbow* 90° (R/D_h) sebesar 1,5 dan panjang *upstream* sepanjang $7D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $15D_h$. Perbandingan distribusi profil kecepatan antara hasil eksperimen dengan penelitian yang dilakukan Rup & Sarna dibandingkan pada posisi yang sama yaitu pada $x/D_h = 1$. Perbedaanya terletak pada pemilihan nilai Re yaitu $Re\ 8.74 \times 10^4$ pada eksperimen kali ini, sedangkan 4.00×10^4 pada penelitian Rup & Sarna. Kemudian *coefficient pressure* pada Rup & Sarna diukur pada $Re\ 9.21 \times 10^4$ sedangkan pada eksperimen kali ini diukur pada $Re\ 8.74 \times 10^4$. Berdasarkan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa perbandingan antara hasil eksperimen yang telah dilakukan dengan penelitian yang dilakukan Rup & Sarna memiliki kesamaan secara pola distribusi meskipun secara nilai pasti tidak sama. Pada distribusi profil kecepatan (gambar 4.10) menunjukkan pola yang identik sama dengan adanya percepatan pada sisi *outer* dan kemudian diikuti dengan terjadinya difusi momentum pada sisi *inner*. Kesamaan pola distribusi profil kecepatan sangat terlihat jelas pada variasi tanpa *inlet disturbance body* (IDB). Hal ini menunjukkan bahwa percobaan yang telah dilakukan memiliki hasil yang bisa dibilang baik karena tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti lain seperti Rup & Sarna. Adapun perbandingan lain yaitu pada distribusi nilai *coefficient pressure* (C_p) seperti pada gambar 4.11. Pada gambar 4.11 terlihat bahwa distribusi nilai *coefficient pressure* antara hasil penelitian Rup & Sarna dengan hasil eksperimen kali ini memiliki kesamaan secara pola meskipun secara nilai berbeda. Pola distribusi C_p dapat dibilang sama karena ketika diposisi *inlet* sama-sama terjadi kenaikan tekanan pada sisi *outer*, sedangkan pada sisi *inner* terjadi penurunan tekanan begitu pula pada posisi *outlet*. Hal

ini menunjukkan bahwa hasil C_p pada eksperimen mendekati benar karena secara pola sudah mirip dengan penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 4.10 Perbandingan profil kecepatan hasil eksperimen dengan penelitian Rup & Sarna (2011) pada *elbow* 90°



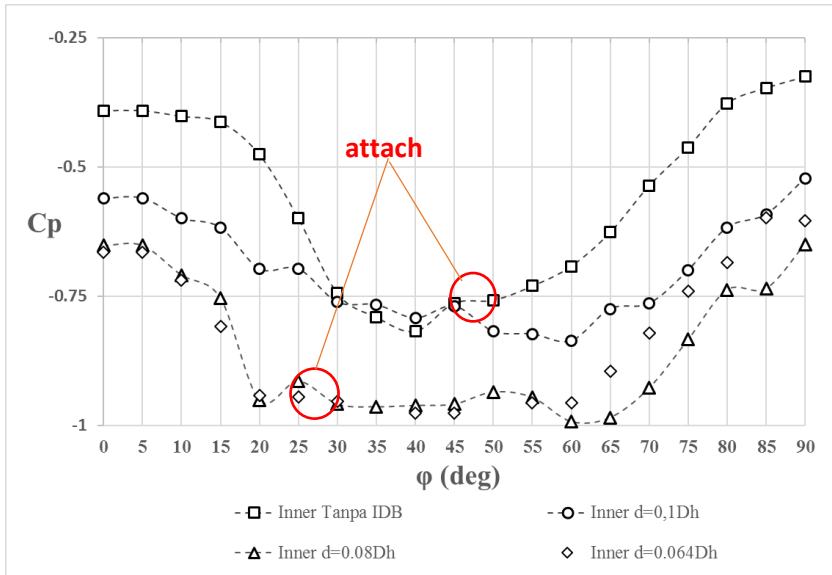
Gambar 4.11 Perbandingan *coefficient pressure* hasil eksperimen dengan penelitian Rup & Sarna (2011) pada *elbow* 90°

4.6.2 *Reattachment* pada *Coefficient Pressure* Sisi *Inner*

Pada sub-bab ini diamati secara detail fenomena yang terjadi pada *coefficient pressure* pada sisi *inner* dan dikomentari penyebab terjadinya fenomena tersebut dan juga akibatnya.

Berdasarkan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa distribusi nilai C_p sisi *inner* memiliki bentuk yang relatif sama pada variasi diameter IDB dan tanpa penambahan IDB. Jika diamati lebih detail distribusi C_p *inner* pada variasi tanpa IDB memiliki distribusi yang relative rata. Sedangkan pada variasi diameter IDB memiliki fenomena adanya distribusi menurun kemudian terjadi kenaikan yang diikuti penurunan kembali pada *trend* distribusi. Fenomena tersebut biasanya disebut *reatachment* yaitu adanya tumbukan (*attach*) dari *shear layer* yang dibentuk oleh penambahan IDB pada

sisi *inner elbow*. Tumbukan *shear layer* pada sisi *inner elbow* dapat mengakitasi *boundary layer* pada sisi *inner elbow*.



Gambar 4.11 Coefficient pressure (C_p) pada sisi *inner* yang di plot untuk $Re\ 8.74 \times 10^4$.

Jika diamati pada gambar 4.12 terjadinya *reatachment* untuk semua variasi diameter IDB secara umum terjadi pada sudut *elbow* 20° . Terjadinya *reataccement* pada setiap variasi membuktikan bahwa ketika ditambahkan IDB telah terjadi *reatachment* sehingga dapat memperkecil *blockage area* dan nilai *pressure drop*. Tetapi pada variasi $0.1 D_h$ terjadi fenomena dimana adanya *reatachment* kembali pada sudut *elbow* 40° . Hal ini menunjukkan bahwa pada diameter $0.1 D_h$ memiliki kesempatan untuk mengakitasi *boundary layer* pada sisi *inner elbow* dua kali dan menaikkan intensitas turbulensi pada sisi *inner elbow*. Berdasarkan fenomena tersebut semakin memeperkuat hasil

pembahasan pada sub-bab 4.1 bahwa pada diameter $0.1 D_h$ nilai *pressure drop* lebih kecil dari pada variasi lainnya.

Namun terjadinya *reattachment* pada sudut yang sama hanya tampak dua kalau selama tiga kali proses pengambilan data, sehingga prosentase terjadinya sekitar 67%. Ketidakpastian terjadinya *reattachment* mencapai 33%, tetapi proses pengambilan data hanya dilakukan tiga kali sehingga deviasinya masih cukup besar. Jika dilihat pada rasio jari-jari *inlet disturbance body* dengan jari-jari kelengkungan *elbow* 90° , maka rasio yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan rasio milik **Wawan & Nuzul (2014)**. Sehingga dapat diyakinkan bahwa terjadi *reattachment* pada sisi *inner*, tetapi posisi terjadinya yang masih menjadi kergauan untuk ditentukan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Berdasarkan pembahasan hasil penelitian pada bab analisa dan pembahasan maka diambil kesimpulan bahwa :

1. Penambahan IDB sebagai bodi pengganggu dapat menurunkan nilai *pressure drop* dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, tetapi penurunan nilai *pressure drop* secara umum efektif pada nilai Re 8.74×10^4 sampai dengan 11.13×10^4 untuk semua variasi diameter. Penurunan nilai *pressure drop* paling efektif pada variasi diameter $0.1 D_h$, yaitu secara rata-rata dapat menurunkan nilai *pressure drop* sebesar 30%.
2. Penambahan IDB sebagai bodi pengganggu dapat menurunkan nilai *loss coefficient elbow* 90° dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dengan nilai tertinggi *loss coefficient elbow* 90° untuk variasi diameter $0.1 D_h$, $0.08 D_h$, dan $0.064 D_h$ adalah 0.05, 0.14, dan 0.17. Nilai tersebut jauh lebih rendah dibandingkan dengan tanpa IDB yang memiliki nilai tertinggi 0.35. Jadi penambahan IDB sangat efektif untuk menurunkan nilai *loss coefficient elbow* 90° , tetapi variasi diameter $0.1 D_h$ memiliki nilai yang paling rendah.
3. Pada grafik *Coefficient Pressure* (C_p) untuk variasi diameter IDB menunjukkan nilai ΔC_p yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa IDB. Tetapi jika diamati pada masing-masing variasi diameter IDB, nilai ΔC_p pada variasi 0.1 menghasilkan ΔC_p yang paling kecil yaitu dengan nilai 0.072. Sehingga pada diameter $0.1 D_h$ merupakan variasi yang paling efektif menurunkan *pressure drop*, karena mampu melawan *advers pressure* dibandingkan tanpa IDB yang hanya memiliki nilai ΔC_p 0.099.

4. Pengamatan profil kecepatan dilakukan pada bidang horizontal dan vertikal. Proses *recovery* aliran lebih cepat dibandingkan ketika ditambahkan IDB dibandingkan dengan tanpa IDB. Karena dengan adanya IDB dapat membentuk *shear layer* yang *attach* pada sisi *inner elbow*, sehingga dapat memperkecil *blockage area* pada *outlet elbow*. Tumbukan tersebut juga meningkatkan intensitas turbulensi sehingga momentum aliran menjadi semakin kuat untuk melawan *advers pressure*.

5.2 Saran

Adapun saran-saran yang diberikan untuk memperbaiki penelitian kedepannya yaitu sebagai berikut :

1. Diperlukan adanya pergantian peralatan instalasi maupun alat ukur untuk menunjang keakuratan pengambilan data.
2. Ketika mengambil data sebaiknya menggunakan thermometer untuk mengatur suhu ruangan, karena kondisi ruangan yang stabil harus dikontrol agar data yang diperoleh baik.
3. Diperlukan adanya kajian eksperimen dengan variasi bentuk *inlet disturbance body* untuk mendapatkan bentuk yang paling tepat berdasarkan jarak, *gap*, diameter yang sudah dikaji sebelumnya.
4. Diperlukan pula simulasi secara numerik untuk memperkuat hasil penelitian yang telah dilakukan. Contohnya memperkuat posisi terjadinya *reattachment* pada sisi *inner elbow*.
5. Memastikan instalasi terpasang dengan benar supaya tidak terjadi *losses* lain, seperti *losses* pada *elbow* meningkat karena sambungan pada *fitting* tersebut masih terdapat kebocoran.

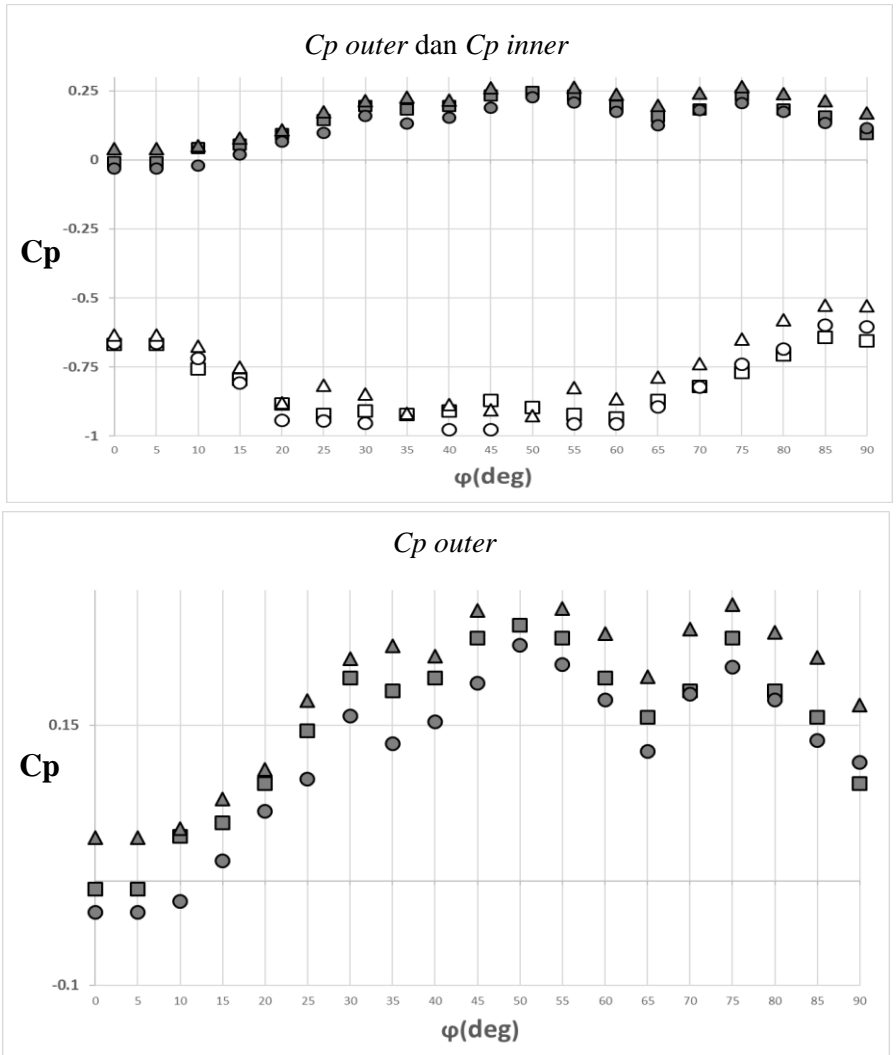
DAFTAR PUSTAKA

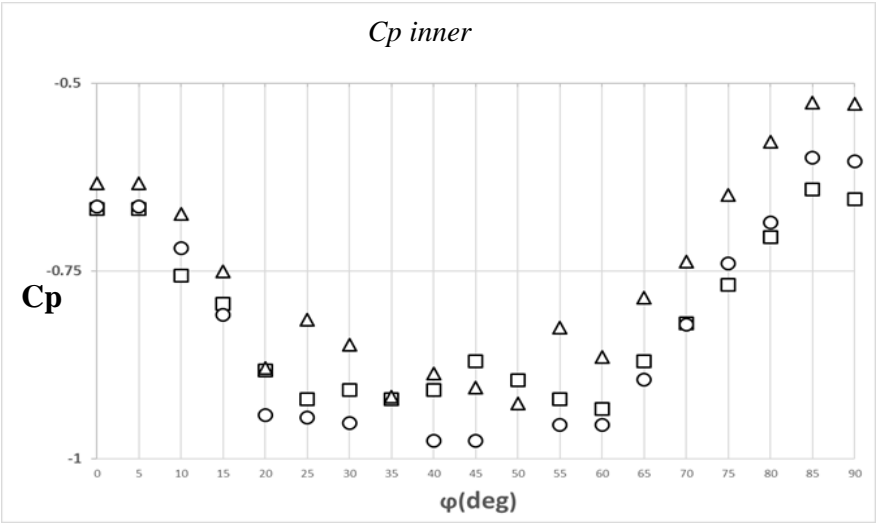
1. Pritchard, P. J. dan Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics* (Vol. 8). Jefferson City : John Wiley & Sons Inc.
2. Miller, D.S. (1990). *Internal Flow System* (Vol. 5). Bedford: BHRA.
3. Nakayama, Y. dan Boucher, R. F. (1998). *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
4. Ra'fat, Al-Waked. (2010). *Introduction to Fluid Mechanics*. Prince Mohammad Bin Fahd University.
5. Sleigh, Andrew dan Noakes, Cath. (2009). *An Introduction to Fluid Mechanics*. CIVE1400 : University of Leeds.
6. Rup, K. dan Sarna, P. (2011). Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow, *Flow Measurement and Instrumentation*, 22, 383-391.
7. Sutardi, A. W. Wawan, Affan.ibnu, Iswati, dan M. D. Sutrisno. (2010). Experimental study of the effect of Guide Vane Insertion and Reynolds Numbers on the Flow Pressure Drop in a 90° Rectangular Elbow, *Journal, Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya*.
8. A.W. Wawan dan P. P. Randi. (2014). Reduction of Drag Force on a Circular Cylinder and Pressure Drop Using a Square Cylinder as Disturbance Body in a Narrow Channel, *Mechanical Engineering*, Sepuluh Nopember Institute of Technology.
9. Dutta, Prasun dan Nandi, Nityananda. (2014). Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends, *Mechanics and Mechanical Engineering*, 1(19), 5-16.
10. Danbon, F. dan Sollicec, C., June (2000). Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the

- Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque. *ASME Journal of Fluids Engineering* ,(122), 337-344.
11. Cheng, D.Y. (1994). Laminar Flow Elbow System and Method, *U.s. Patent Documents*, 5, 323-661.
 12. Choi,J.H dan Lee, S.J. (2000). Ground Effect Of Flow Around An Elliptic Cylinder In A Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid and Structures*, 14, 697-709.
 13. Deng, Shi-Ming dan Burnett, Jhon. (1998). A Study of Energi Performance of Hotel Building in Hong Kong, *Energi and Building*, 31, (2000) 7-12.

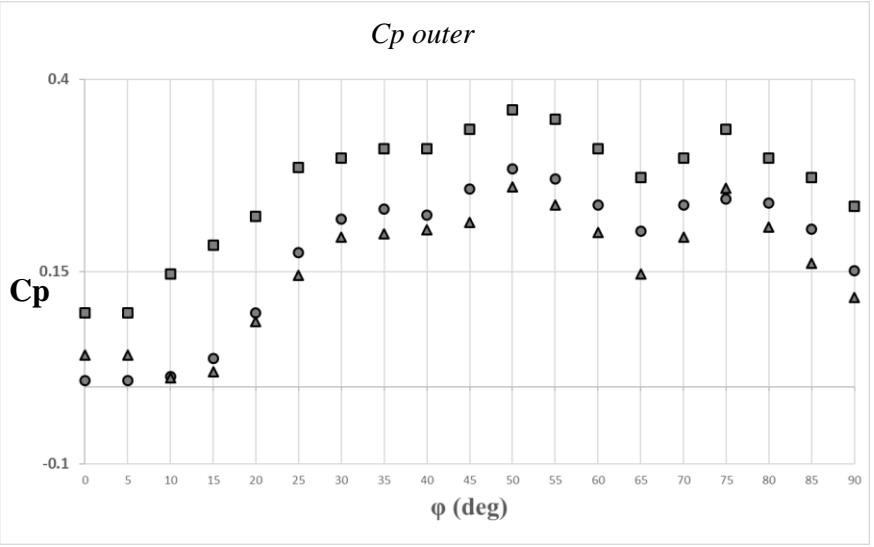
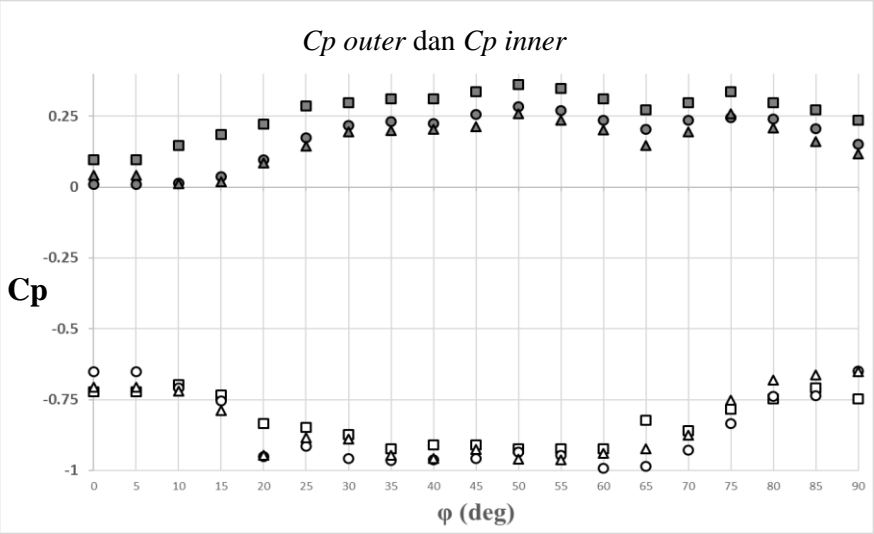
LAMPIRAN

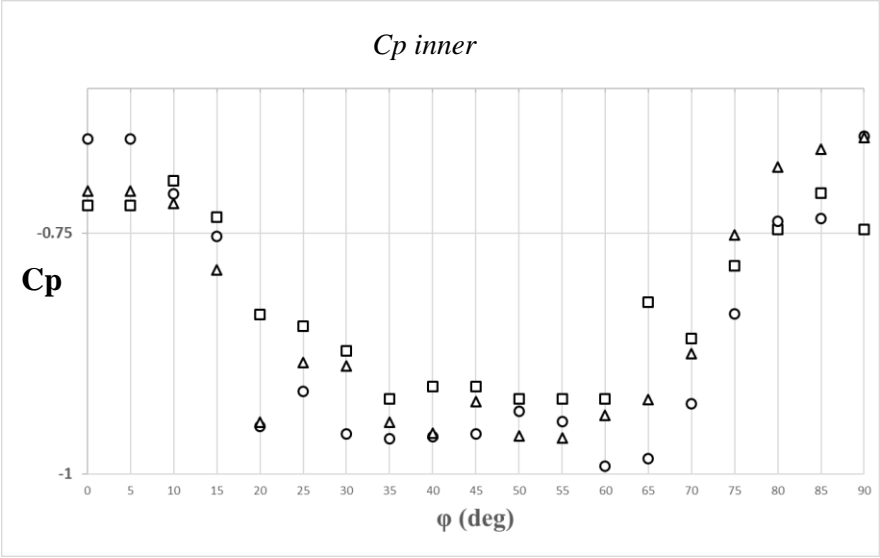
Lampiran 1. Pressure Coefficient Elbow 90° Variasi $0.064D_h$ pada $Re_{Dh} = 3,97 \times 10^4$; $8,74 \times 10^4$; dan $13,5 \times 10^4$



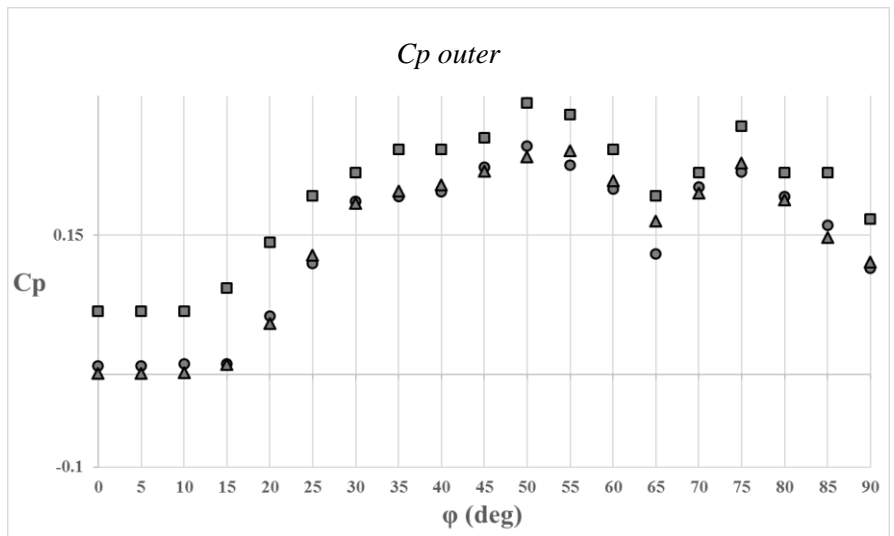
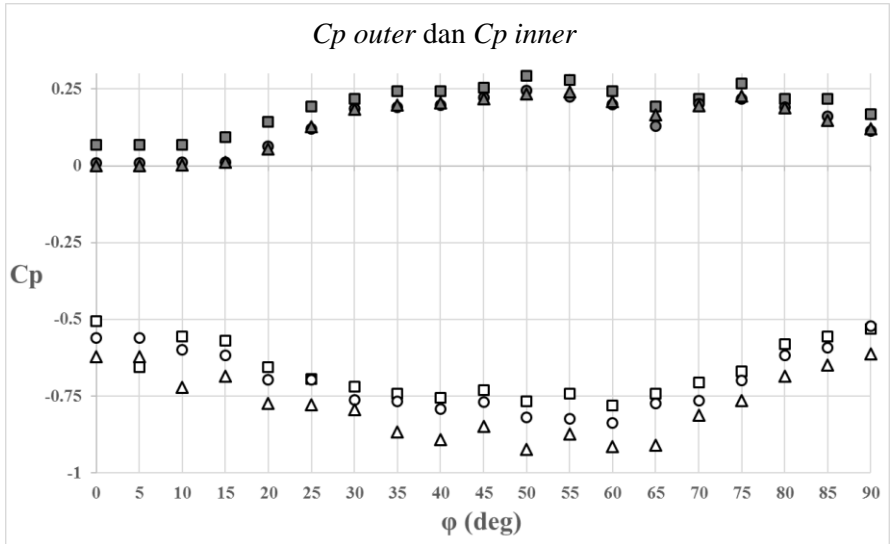


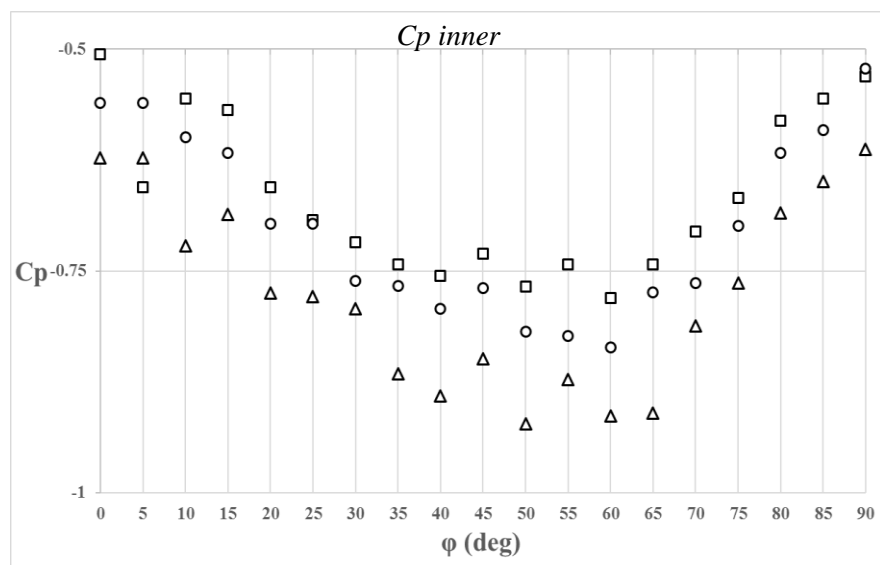
*Lampiran 2. Pressure Coefficient Elbow 90° Variasi 0.08D_h
pada Re_{Dh}= 3,97x10⁴; 8,74x10⁴; dan 13,5x10⁴*





Lampiran 3. Pressure Coefficient Elbow 90° Variasi 0.1D_h pada Re_{Dh}= 3,97x10⁴; 8,74x10⁴; dan 13,5x10⁴





BIODATA PENULIS



Angga Eka Wahyu Ramadan dilahirkan di Banyuwangi, 30 Januari 1995 anak semata wayang yang dilahirkan dari orang tua terbaik bernama Sumardi dan Sri Astutik Rustiningsih. Riwayat Pendidikan penulis diawali di SDN 2 Jajag, Banyuwangi pada tahun 2001-2007. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 2 Gambiran pada tahun 2007-2010, kemudian dilanjutkan di SMA Negeri 1 Genteng, Banyuwangi pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan Pendidikan jenjang S-1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SBMPTN Tulis yang dilaksanakan di Universitas Jember, Jember.

Penulis berperan aktif dalam kegiatan akademik maupun nonakademik (organisasi) selama perkuliahan. Dalam bidang akademik penulis aktif berkuliah, menjadi asisten praktikum, asisten dosen, dan menjadi koordinator laboratorium mekanika dan mesin-mesin fluida. Sedangkan dalam berorganisasi penulis aktif berorganisasi di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin sebagai Kabirot Akademik, di Paguyuban Karya Salemba Empat ITS sebagai Kepala Departemen, dan di ITS Team Sapuangan sebagai Kepala Divisi.

Motto hidup penulis adalah “ Suksesku adalah sukses kalian” menjadikan penulis lebih giat dalam mengejar semua mimpi dan cita-cita untuk selalu memberikan manfaat untuk orang-orang yang ada didekat penulis, agama, nusa, dan bangsa. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir dan perkuliahan di Departemen Teknik Mesin dapat menghubungi penulis melalui email panggotramadan@gmail.com .